



# Variabilité saisonnière et interannuelle (2000-2013) de l'abondance, de la biomasse et du spectre de taille du zooplancton dans le bassin Levantin

Anthony Ouba

## ► To cite this version:

Anthony Ouba. Variabilité saisonnière et interannuelle (2000-2013) de l'abondance, de la biomasse et du spectre de taille du zooplancton dans le bassin Levantin. Écosystèmes. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2015. Français. <NNT : 2015PA066545>. <tel-01325647>

**HAL Id: tel-01325647**

**<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01325647>**

Submitted on 2 Jun 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Université Pierre et Marie Curie

Ecole Doctorale des Sciences de l'Environnement d'Ile de France – ED 129

*Laboratoire d'Océanographie de Villefranche-sur-mer (LOV)*

## **VARIABILITE SAISONNIERE ET INTERANNUELLE (2000-2013) DE L'ABONDANCE, DE LA BIOMASSE ET DU SPECTRE DE TAILLE DU ZOOPLANKTON DANS LE BASSIN LEVANTIN**

Par Anthony OUBA

Thèse de doctorat en Sciences du Vivant et de l'Environnement

Dirigée par Lars STEMMANN et Marie ABBOUD-ABI SAAB

Présentée et soutenue publiquement le 20 novembre 2015

Devant un jury composé de :

JAMET Jean-Louis	Professeur, Rapporteur
DALY-YAHIA Mohamed Néjib	Professeur, Rapporteur
TIRELLI Valentina	Docteur, Examineur
NIVAL Paul	Professeur, Examineur
ABBOUD-ABI SAAB Marie	Professeur, Co-directeur de thèse
STEMMANN Lars	Professeur, Directeur de thèse



Except where otherwise noted, this work is licensed under  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>

*A ma famille*

*A mon Père, à ma mère*

*A mon frère et mes deux sœurs*

# Remerciements

Je suis redevable à la station Zoologique de Villefranche-sur-mer, en particulier au Laboratoire d'Océanographie de Villefranche-sur-mer (LOV), pour m'avoir accueillie pendant mes années de thèse. Ils m'ont offert un cadre de travail très enrichissant au cours des séjours soutenus par la chaire CNRS/UPMC. Je tiens à remercier le Conseil National de la Recherche Scientifique CNRS-Liban, pour m'avoir donné une bourse pour effectuer la thèse, ainsi que pour m'avoir accueilli durant ma thèse au sein du Centre National des Sciences Marines (CNSM).

Mes remerciements sont également adressés à Mr Mohamed Néjib Daly-Yahia et Mr Jean-Louis Jamet qui ont jugé ce travail. Je remercie également Mr Paul Nival et Mme Valentina Tirelli qui ont accepté de présider le Jury. Ils m'ont tous fait l'honneur d'être présents à ma soutenance de thèse et leurs remarques m'ont été très bénéfiques.

J'adresse toute ma reconnaissance à Mr Gabriel Gorsky, directeur de l'Observatoire Océanologique de Villefranche-sur-mer (OOV) et à Mr Gaby Khalaf, directeur du Centre National des Sciences Marines, pour m'avoir accueillie pendant mes années de thèse. Merci pour la bonne humeur qu'ils font régner dans leurs équipes.

Ma gratitude et mes respects à mon directeur de thèse Lars Stemmann et ma co-directrice de thèse Marie Abboud-Abi Saab. Sans votre confiance et votre soutien, cette thèse n'aurait pas été possible. Merci à vous deux, pour l'encadrement ainsi que pour avoir mis à ma disposition vos vastes expériences, conseils et interprétations pour m'aider à accomplir ce travail, qui n'aurait pu être mené à bien sans votre entière implication, votre patience et gentillesse.

De nombreuses personnes ont participé à ce travail et permis son aboutissement. Je tiens à leur exprimer ma profonde reconnaissance et ma sincère gratitude. Je remercie particulièrement Elie Tarek, qui a participé à effectué l'échantillonnage dès le début jusqu'à la fin. J'adresse mes sincères remerciements à Amanda Elineau pour sa contribution essentielle dans l'analyse sur le "Zooscan" et qui est toujours prête pour tout appui. Je remercie également Jean-Baptiste Romagnan pour son aide précieux dans les traitements des données, ainsi que Robin Failletaz pour sa contribution fondamentale dans les analyses des données sous "R".

Je tiens à remercier tous le personnel du CNRS-Liban pour leur accueil chaleureux ainsi que pour leur gentillesse et confiance. Je tiens à remercier aussi tous les membres de l'équipe du CNSM, surtout Marie-Thérèse Kassab pour son aide dans le comptage du phytoplancton, Nada Matar pour l'analyse des nutriments, Milad Fakhri pour sa contribution dans l'échantillonnage, Sanaa Tahan, Roula Mina, Viviane Awad et Carine Abi Ghanem pour leurs soutiens dans toutes les situations.

De même, un immense remerciement au personnel du LOV et au membre de l'équipe (passés et encore présents) supervisé par Lars Stemmann, Marc Picheral, Corinne Desnos, Lionel Guidi, Fabien Lombard, Jean Olivier, Sakkina Dorothé et Léo Berline pour leurs conseils et leurs expertises précieuses dans le monde du zooplancton.

Mes remerciements les plus vifs sont adressés à Mme Maria Grazia Mazzocchi pour ses précieux conseils, son expertise et pour la façon efficace et amicale avec laquelle elle a suivi mon travail. Je tiens également à remercier Mme Véronique Gourbaud pour sa défense bec et ongles la réservation d'une chambre à l'OOV pour garder ma place.

J'exprime ma sincère amitié à Alexy Saliba, Wissam Kosseify, Elie Hajj, Fabio Benedetti, Simon Ramondenc, Nicolas Mayot et tous ceux que j'oublie ici. Je leur témoigne tout mon respect pour leur disponibilité et leur aide.

J'adresse ma reconnaissance et ma gratitude à mes collègues Myriam Lteif, Sharif Jemaa, Céline Mahfouz, Laury Açaf, Elissar Gemayel, Abed el Rahman Hassoun et Ali Badreddine pour leur amitié et les moments que j'ai partagé tout le long de ma thèse.

Ma profonde gratitude et mon obligeance va ensuite envers ma famille, mes parents Boutros et Mona Ouba, mon frère Dany et mes deux sœurs Dona et Stéphanie. Leur foi en moi et leur soutien m'ont été primordiaux.

# Sommaire

Remerciements.....	2
Sommaire .....	4
Chapitre 1: Introduction.....	7
Contexte général .....	7
Etats des connaissances.....	9
<i>Mer Méditerranée</i> .....	9
<i>Circulation générale du courant de surface et des courants locaux</i> .....	10
<i>Eastern Mediterranean Transient : EMT et EMT-like</i> .....	12
<i>Changements environnementaux et leurs impacts sur le plancton</i> .....	14
Suivi du zooplancton dans la Méditerranée .....	15
<i>Objectifs et organisation du manuscrit</i> .....	20
Chapitre 2 : Matériels et Méthodes .....	23
Situation géographique du Liban .....	23
<i>Morphologie de la zone côtière</i> .....	23
<i>Topographie et bathymétrie: un plateau continental étroit</i> .....	23
Zone d'étude .....	24
<i>Présence de l'embouchure de la rivière Al-Jaouz</i> .....	24
<i>Complexe d'engrais chimique de Selaata</i> .....	25
Choix de la station étudiée.....	25
<i>Analyses hydrologiques</i> .....	28
Traitement des échantillons .....	29
<i>Dosage des orthophosphates</i> .....	29
<i>Dosages des nitrates et nitrites</i> .....	30
<i>Estimation de la biomasse chlorophylle-a de surface</i> .....	30
<i>Comptage du phytoplancton</i> .....	30
<i>Analyses au Zooscan</i> .....	31
Description de l'appareil .....	31
Préparation des échantillons .....	32
Protocole de travail de Zooscan et Traitement des images .....	35
Contrôle qualité des données obtenues par le Zooscan .....	39
<i>Elimination de la petite fraction d2 de l'analyse</i> .....	43
<i>Elimination du groupe des multiples</i> .....	44
Traitement sur les données.....	45
<i>Détermination de la densité de l'eau de mer</i> .....	45
<i>Calcul de l'indice de stabilité de la colonne d'eau</i> .....	45
<i>Calcul des abondances du zooplancton</i> .....	45
<i>Calcul des biovolumes du zooplancton</i> .....	45
<i>Calcul des biomasses du zooplancton</i> .....	46
<i>Construire un spectre de taille NB-SS du zooplancton</i> .....	46
<i>Analyse des NB-SS par groupement hiérarchique</i> .....	47
<i>Calcul des valeurs manquantes et la régularisation des données</i> .....	47
<i>Analyse statistique</i> .....	48
Chapitre 3 : Cycle annuel de l'écosystème planctonique dans la zone côtière libanaise .....	51
Introduction.....	51

Résultats .....	53
<i>Cycle annuel des paramètres météorologiques</i> .....	53
<i>Cycle annuel des paramètres physiques</i> .....	54
<i>Cycle annuel des paramètres biogéochimiques</i> .....	58
<i>Cycle annuel de la biomasse de chlorophylle-a</i> .....	61
<i>Cycle annuel de la communauté phytoplanctonique</i> .....	62
Phytoplancton total .....	62
Groupes de phytoplancton .....	63
<i>Structure de la communauté zooplanctonique</i> .....	64
Cycle annuel du zooplancton total .....	67
Dynamique des abondances des populations zooplanctoniques .....	68
Dynamique des biovolumes des populations zooplanctoniques .....	71
<i>Forçage des variables climatiques sur l'hydrologie</i> .....	75
<i>Sources continentales des nutriments</i> .....	75
<i>Impact des forçages environnementaux sur la dynamique du plancton</i> .....	77
<i>Analyse comparative du zooplancton avec les travaux précédents</i> .....	78
<i>Impact des forçages environnementaux sur la dynamique du zooplancton</i> .....	81
<i>Modèle synthétique de la succession</i> .....	81
Conclusion .....	84
Chapitre 4 : La variabilité interannuelle de l'abondance et de la composition du zooplancton dans les eaux côtières libanaise (point B2) .....	85
Introduction .....	85
Résultats .....	88
<i>Variabilité interannuelle des paramètres météorologiques</i> .....	89
<i>Variabilité interannuelle des paramètres hydrologiques</i> .....	92
<i>Variabilité interannuelle des facteurs biogéochimiques</i> .....	99
<i>Variabilité interannuelle du phytoplancton</i> .....	103
Biomasse de la Chlorophylle-a par satellite .....	103
Comptages cellulaires .....	104
<i>Variabilité interannuelle de l'ensemble du zooplancton</i> .....	107
<i>Moyenne annuelle des abondances des différents taxa</i> .....	108
<i>Sommes cumulées des abondances des différents taxa</i> .....	111
<i>Biomasse du zooplancton non gélatineux</i> .....	113
Discussion .....	114
<i>Evolution à long terme</i> .....	114
<i>Evolution interannuelle</i> .....	117
<i>Evolution à court terme</i> .....	119
Conclusion .....	123
Chapitre 5 : Etudes des spectres de taille du zooplancton total au point B2 .....	125
Introduction .....	125
Résultats .....	126
Ensemble des spectres de taille NB-SS .....	126
Analyse en dendrogramme des spectres d'abondances .....	126
Série temporelle de la pente des spectres de taille du zooplancton total .....	128
Analyse des spectres de taille cumulés par dendrogramme .....	131
Discussion .....	134

<i>Conclusion</i> .....	137
Chapitre 6 : Discussion Générale.....	138
Conclusion et perspectives.....	145
Bibliographie.....	148
Table des illustrations .....	197
Table des tableaux.....	202



## Chapitre 1: Introduction

### Contexte général

*"To understand the entire marine ecosystem, we need to better understand the plankton. They play a key role in the oceanic food web and may be key indicators of ecosystem change (NMFS-COPEPOD 2009)".*

C'est par cette assertion intéressante que le groupe d'experts du "NMFS-ST *Marine Ecosystems Division*" s'adresse aux auteurs pour attirer le regard sur l'importance du plancton dans le fonctionnement de l'écosystème et à la valeur économique des services rendus.

Le plancton comprend les organismes vivants dont les mouvements ne leur permettent pas de s'affranchir des courants. Cet ensemble regroupe des organismes disparates dont la taille varie, si on exclut les virus, depuis le picomètre (bactérie) jusqu'au mètre (grandes méduses) et comprends des autotrophes (phytoplancton), des mixotrophes (nombreux protistes) et des hétérotrophes (zooplancton). Ces derniers, ainsi que leurs interactions avec leurs environnements physiques et biologiques, constituent le focus de ce travail. Le zooplancton regroupe des organismes occupant un très large spectre de taille allant de quelques  $\mu\text{m}$  de large pour certains ciliés jusqu'à 2 m de diamètre pour certaines méduses. Il constitue un élément de contrôle dans les réseaux trophiques et implique une liaison étroite avec les niveaux trophiques inférieurs et supérieurs. (Banse 1995). Le zooplancton marin représente également un vecteur important dans les transferts de matière et d'énergie vers des niveaux supérieurs au sein de l'écosystème pélagique marin (Banse 1995). En effet, il se nourrit à partir des producteurs primaires tels que les diatomées et les dinoflagellés (Aubry et al. 2012). Ce sont les larves de poissons et les petits pélagiques tels que les sardines et les anchois qui se nourrissent de zooplancton (Costalago et al. 2011). De même, le zooplancton, et surtout les copépodes, contribuent à la pompe biologique de carbone par leurs productions en surface de matière particulaire à forte sédimentation et leurs actions de transformation sur celle-ci en profondeur (Stemmann and Boss 2012). La production du zooplancton est à la fois en fonction i) de la concentration en nourriture disponible et un contrôle de type "bottom-up" est exercé dans ce cas-là par les bas niveaux trophiques vers ceux

supérieurs et ii) de la pression trophique que les organismes zooplanctonophages exercent sur les herbivores et le contrôle est alors de type "top down".

La réponse du zooplancton est considérée comme étant un indicateur biologique des stress environnementaux (Dolbeth et al. 2012) comme le changement climatique (Beaugrand and Reid 2003 ; Richardson and Schoeman 2004 ; Fernandez et al. 2004 ; Hays et al. 2005 ; Garcia-Comas et al. 2011), hydrologique et hydrodynamique (Christou 1998 ; Weikert et al. 2001 ; Mazzocchi et al. 2003 ; Conversi et al. 2009). Il est physiologiquement sensible aux variations environnementales (Harris et al. 2000 ; Riccardi and Mariotto 2000 ; Caron and Hutchins 2013). L'impact d'un changement environnemental, qu'il soit régional ou à grande échelle, se propage assez rapidement à travers la chaîne alimentaire à cause du couplage trophique relativement serré au sein du maillon (entre organisme herbivores et carnivores) (Roemmich and McGowan 1995 ; Richardson and Schoeman 2004) affectant par la suite les services écosystémiques (citons la pêche, le tourisme, la séquestration du carbone en profondeur). Il ajoute par la suite des stress supplémentaires à ceux déjà existants aux niveaux trophiques supérieurs (poissons et mammifères) (Richardson and Schoeman 2004). En d'autre terme, une perturbation quelconque perçue par le zooplancton se répercutera forcément sur les autres maillons du réseau trophique.

Le fonctionnement des écosystèmes planctoniques dépend fortement de la taille des organismes. Cette dernière est considérée comme un descripteur synthétique clé de la dynamique des communautés (Platt and Denman 1977 ; Zhou and Huntley 1997). La distribution de taille du zooplancton renseigne sur la composition des espèces, les cycles de vie (reproduction, croissance, mortalité et sélectivité dans la prédation) et la productivité du système (Zhou 2006). De même, elle fournit des informations sur la taille des proies potentielles disponibles pour les petits poissons pélagiques (Bachiller and Irigoien 2013), ainsi que l'efficacité du flux de matière au sein de la communauté (Sourisseau and Carlotti 2006). Le Spectre de Taille-Biomasse Normalisé ou NB-SS (Normalized Biomass-Size Spectra) (Platt and Denman 1977) est le plus communément utilisé pour estimer la dynamique de cette structure. Sa forme est supposée dépendre des interactions entre les proies et les prédateurs comme étant un flux continu de biomasse et d'énergie d'une classe de taille à la classe suivante, sans tenir compte de la composition taxonomique de la communauté.

La Méditerranée de haute mer contient un écosystème planctonique très intéressant à étudier au vue des caractéristiques géomorphologiques et topographiques de la complexité de la dynamique physique (la circulation thermohaline, la circulation des différentes masses d'eaux, les gyres, les activités à méso-échelles, etc.) et de sa biodiversité importante. L'analyse des grandes bases de données mondiales du zooplancton (NMFS-COPEPOD 2009) montre cependant que de grandes régions notamment à l'Est du bassin sont dépourvues d'observations sur le zooplancton.

## Etats des connaissances

### Mer Méditerranée

Ayant une superficie de 2.97 millions de km<sup>2</sup> et un volume de 4.24 millions de km<sup>3</sup>, la Méditerranée est un bassin quasi fermé dont le détroit de Gibraltar est la seule ouverture naturelle avec l'océan Atlantique. La Méditerranée est subdivisée en deux bassins principaux : le bassin Ouest ou occidental et le bassin Est ou oriental, tous deux séparés par le seuil de Sicile. Chaque bassin est lui-même divisé en sous bassins parfois eux même subdivisés en différentes zones géographiques de tailles inférieures portant le nom de mers, Golfes ou baies.

Les eaux de la mer Méditerranée sont parmi les plus pauvres en nutriment de l'océan mondial en surface tant qu'en profondeur (Psarra et al. 2005). En surface, la concentration moyenne des N-NO<sub>3</sub> et des N-NO<sub>2</sub> est de 0.1 µMol.L<sup>-1</sup> et celle de P-PO<sub>4</sub> est de 0.03 µMol.L<sup>-1</sup>. Cependant, la concentration des sels nutritifs suit un gradient négatif Ouest-Est en diminuant au fur et à mesure de son rapprochement du bassin oriental de la Méditerranée (Ignatiades et al. 2009 ; Siokou-Frangou et al. 2010 ; Nowaczyk et al. 2011) jusqu'à montrer un environnement oligotrophe, voir ultra-oligotrophe dans le bassin Levantin (Berman et al. 1984 ; Krom et al. 1991 ; 2014 ; Tselepides et al. 2000) incluant les eaux libanaises. Il présente les plus faibles teneurs en sels nutritifs ainsi qu'une faible concentration en chlorophylle-*a* et en production primaire (D'Ortenzio and Ribera d'Alcalà 2009). Tout enrichissement continu du littoral en sels nutritifs provenant des eaux continentales terrestres et des fleuves, affecte sensiblement l'écosystème et se traduit par un développement phytoplanctonique brusque (Nincevic-Gladan et al. 2015) suivi par un autre de zooplancton (Aubry et al. 2012).

Du point de vue géomorphologique, la Méditerranée ressemble beaucoup à l'océan mais en modèle réduit avec des plateaux continentaux, des fosses océaniques et des seuils, etc... De même, elle est considérée comme étant un bassin de concentration, du fait du taux d'évaporation dépassant celui de la précipitation et les fleuves qui y débouchent. Les échanges de chaleur et d'eau entre l'océan et l'atmosphère, en modifiant la température et la salinité et par la force du vent, détermine et affecte la circulation thermohaline globale (Robinson et al. 1991 ; Bergamasco and Malanotte-Rizzoli 2010). Ces échanges commandent l'entrée des eaux atlantiques, la formation d'eau profonde en hiver, les échanges entre les différents bassins (Millot 1999). Le plancton, dérivant avec le courant, est un indicateur hydrologique qui, dans de nombreux cas, sera couplé à la masse d'eau qui le transporte (Allain 1964 ; Weikert et al. 2001).

### **Circulation générale du courant de surface et des courants locaux**

Le courant de surface permanent (0-200 m) provient de l'océan Atlantique (EA) pénètre en Méditerranée par le détroit de Gibraltar (Figure 1). Ce détroit relativement étroit (~13 km) et peu profond (~300 m), permet le mélange avec l'eau méditerranéenne préexistante tout en se dirigeant vers le bassin Est de la Méditerranée (Bergamasco and Malanotte-Rizzoli 2010 ; Rohling et al. 2009). Cet afflux formant la couche de surface longe parallèlement la côte Nord-africaine et porte le nom de l'Eau Atlantique Modifiée (EAM). Le gradient de la pression atmosphérique entre le bassin occidental et oriental détermine le débit d'écoulement de l'eau dans la direction du bassin oriental. En général, sur le bassin oriental, la pression atmosphérique est toujours inférieure à celle régnant sur le bassin occidental, par conséquent, un courant vers l'Est est alimenté en permanence.

L'EAM est suivie au niveau du détroit de Sicile en Tunisie (de 130 km de largeur et d'une profondeur moyenne de 330 m). Wüst (1960) et Pinardi and Masetti (2000) ont montré la topographie complexe de ce détroit et son rôle dynamique dans la circulation de l'eau. La salinité et la température augmentent régulièrement au fur et à mesure de sa pénétration vers l'Est en conséquence à une évaporation de plus en plus intense (Wüst 1960 ; Malanotte-Rizzoli and Hecht 1988). Ce courant perd en grande partie de son intensité le long de son parcours (Pinardi and Masetti 2000). L'EAM alimente également le bassin Ionien d'où le nom du Mid-Ionian Jet (MIJ) qui, dirigé vers l'Est dans le Levantin, portera le nom de Mid-Mediterranean Jet (MMJ). Ce

dernier traverse le secteur central du Levantin en direction Est avec une vitesse de 15-20 cm/s et alimente le tourbillon du Rhode (Rhode Gyre, RG) au Sud-Ouest du Chypre (Zodiatis et al. 2005).

En allant vers le Sud, l'EAM entrant est nommé Courant Libyo-Egyptien (LEC) et continue en direction de la partie Nord de la côte Libyenne vers le bassin oriental (Gerin et al. 2009 ; Millot et al. 2005). Il se dirige vers l'Est au large et en face des côtes égyptiennes. A ce niveau, la vitesse de ce courant principal tombe très rapidement de 100 cm/s (à Gibraltar) jusqu'à 20 cm/s. On note la formation des tourbillons cycloniques et anticycloniques à différents échelles tout au long du parcours de ce courant de surface et dans ces deux côtés, notamment le tourbillon du Chypre (CE) et le tourbillon de Shikmona (ShE). Arrivant à l'extrémité Est de la Méditerranée, le courant LEC embrasse les côtes palestiniennes et tourne brusquement vers le Nord. Il longe parallèlement le littoral palestinien, libanais puis syrien pour arriver auprès de la côte de la Turquie. Il se rencontre avec le MMJ et arrive ensuite au Nord du Chypre avec une direction Ouest et y porte le nom de Courant Mineur d'Asie (AMC) (Robinson et al. 1991 ; Zodiatis et al. 2005).

Au niveau de la côte Libanaise, on trouve que le courant de surface suit d'une façon générale le vent Sud-Ouest ou SSW qui domine tout le long de l'année (Abboud-Abi Saab et al. 2004). En arrivant au Liban, il devient faible et variable, dépendant largement du vent, de la topographie de la côte et du relief du plateau continental qui peuvent parfois changer son chemin et de prendre des allures différentes, même la capacité de changer sa direction vers le côté opposé. Des courants locaux à importance significative se détachent de courant général. Ils se dirigent vers le Nord ou vers le Sud avec une prédominance vers le Nord pendant la période entre décembre et juillet (Sogreah 1965).

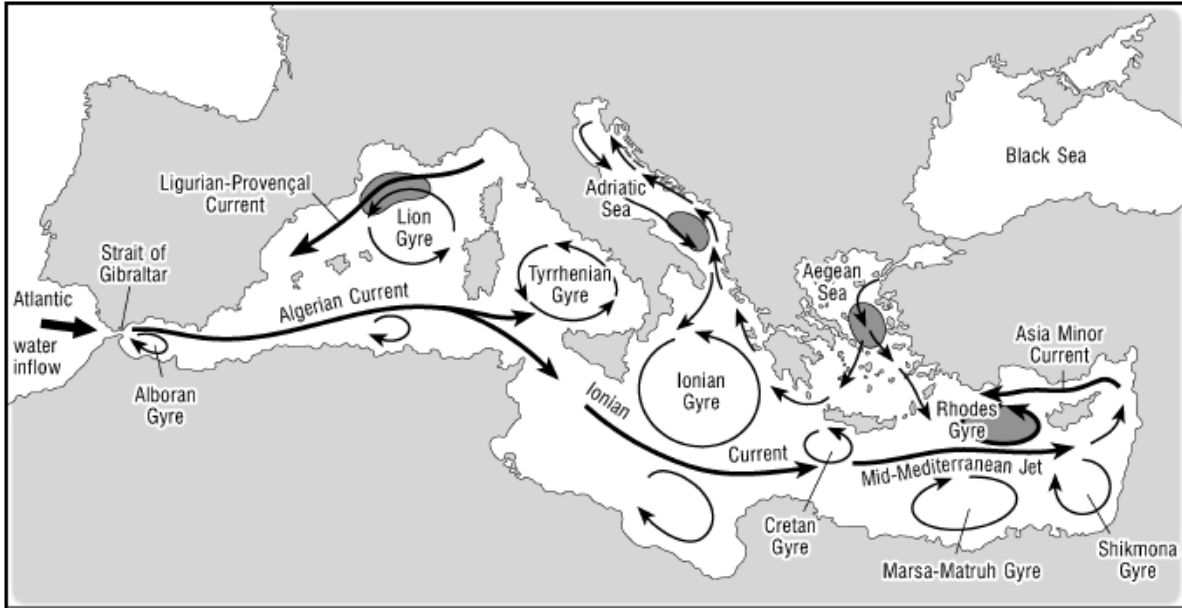


Figure 1 : La circulation de l'eau de surface dans le Méditerranée (Vergnaud-Grazzini et al. (1988) et Roussenov et al. (1995)) modifiée par Rohling et al. (2009). Les zones ombrées indiquent la formation des eaux intermédiaires et des eaux profondes.

### Eastern Mediterranean Transient : EMT et EMT-like

Dans le bassin oriental de la Méditerranée, l'Adriatique a été connue depuis longtemps comme étant une source principale des eaux profondes (Adriatic Deep Water). Elle s'enfonce dans les abysses de l'Ionien et du Levantin (Eastern Mediterranean Deep Water, EMDW) (Figure 2 A). Roether and Schlitzer (1991) ont trouvé que la masse d'eau formée dans l'Adriatique est un mélange entre l'eau de surface (Atlantic Water, AW) venant du côté Nord de ce bassin et celle du levantine intermédiaire (Levantine Intermediate Water, LIW) qui est relativement plus chaude et salée et pénétrante à travers le canal d'Otrante. Ces auteurs ont indiqué que le sous bassin Adriatique est le moteur de la circulation thermohaline dans le bassin Est de la Méditerranée reliant les deux sous-bassins Levantin et Ionien sous une seule cellule cohérente. Par contre, la Mer Egée, considérée comme un contributeur mineur dans la formation de ces eaux profondes, est devenue beaucoup plus effective que l'Adriatique. Plusieurs études ont détecté une conversion de la circulation de la couche de surface du sous bassin Ionien du cyclone à anticyclone et vice versa menant à ce type de changement et stimulé parfois par des forces atmosphériques externes (tourbillons barocliniques) (Demirov and Pinardi 2002 ; Pujol and Larnicol 2005). Plus

spécifiquement, un bouleversement du mode cyclonique à anticyclonique survenait dans ce sous bassin fin des années 1980s (Malanotte-Rizzoli et al. 1999 ; Demirov and Pinardi 2002).

La redistribution de source est en fait associée au renversement du Gyre du Nord Ionien (GIR) (Roether et al. 1996), d'où le nom "Adriatic-Ionian Bimodal Oscillation System, BIOS". (Gačić et al. 2011). Une substitution avec la région Sud de la Mer Egée donne naissance à des nouvelles masses d'eau : les eaux profondes crétoises (Cretan Deep Water, CDW) et les eaux intermédiaires crétoises (Cretan Intermediate Water, CIW). Le phénomène appelé "Eastern Mediterranean Transient, EMT", apporte au bassin Levantin une nouvelle masse d'eau profonde plus salée, plus chaude et plus dense que l'ancienne existante d'origine Adriatique (Figure 2 B). Elle pousse cette dernière vers les couches les plus élevées et bouleverse par la suite la circulation générale du "Conveyor belt" du bassin oriental (Roether et al. 1996). Plusieurs scénarios ont été proposés pour expliquer les causes potentielles de l'EMT, autre que les changements locaux extrêmes des conditions atmosphériques et de salinité dans la Mer Egée. Zervakis et al. (2000) ont suggéré que cet événement a commencé suite à une variation des flux d'eaux douces de la Mer Noire vers la Mer Egée à travers le détroit de Dardanelles. Tandis que d'autres ont lié ce phénomène aux d'autres mécanismes comme le changement des flux d'évaporation – précipitation dans le Levantin (Tsimplis and Josey 2001). Plus récemment, Theocharis et al. (2014) a constaté que les deux Mers Egée et Adriatique entrent en compétition pour la source d'eau profonde du Levantin et agissent d'une façon alternative à peu près chaque dix ans. Gačić, et al. (2011) ont détecté un autre renversement du GIR dans l'Ionien en 2006. Les auteurs ont suggéré un début d'autre EMT. Krokos et al. (2014) et Velaoras et al. (2014) ont distingué cette période et l'ont nommé "EMT-like". Elle a été principalement due au mécanisme interne sans aucune intervention d'un forçage atmosphérique (Krokos et al. 2014). Ayant une densité entre celle du LIW et de l'EMDW, la nouvelle masse d'eau produite se propage dans le bassin oriental de la Méditerranée et contribue à la formation d'une nouvelle masse d'eau profonde du Levantin. Un retour à la situation initiale, similaire au pre-EMT et EMT-like (avant 1987 et 2006), a été détecté en 2010 par Krokos et al. (2014) et Velaoras et al. (2014). Elle a été associée à un retour complet de la circulation de la couche supérieure ionienne au mode cyclonique.

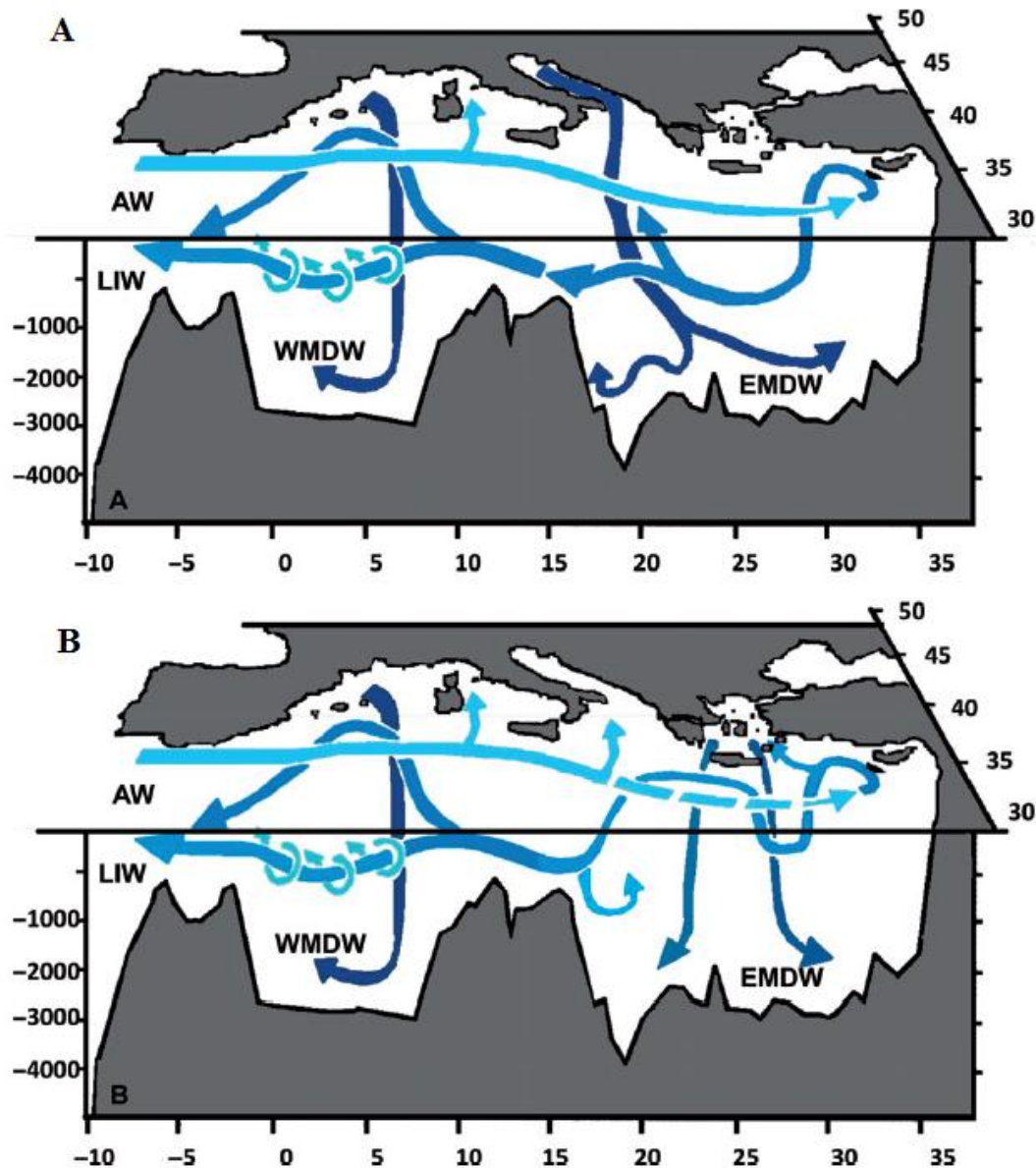


Figure 2 : Circulation thermohaline dans la mer Méditerranée (Tsimplis et al. (2006) modifiée par Bergamasco and Malanotte-Rizzoli (2010)) A) avant et B) durant l'Eastern Mediterranean Transient (EMT)

## Changements environnementaux et leurs impacts sur le plancton

Les changements globaux perturbent la dynamique des populations des organismes, donc de nombreux écosystèmes marins (Valdes et al. 2007 ; Beaugrand and Kirby 2010 ; Lejeusne et al. 2010 ; Beaugrand et al. 2015). Leurs conséquences restent une occupation ou un souci majeur ; d'autant plus que la Méditerranée est soumise à une forte pression démographique la



rendant une mer très fragile et altérable (De Madron et al. 2011). Par conséquent, cette mer constitue une des zones du monde les plus intéressantes de point de vue écologique à étudier. Modéliser et comprendre ces changements sur les écosystèmes planctoniques en particulier, restent toujours des essentiels et un centre d'intérêt des scientifiques.

Plusieurs études ont été réalisées sur la variabilité du zooplancton en terme de dynamique, composition et distribution spatio-temporelle contre le changement climatique et hydrologique (Christou 1998 ; Beaugrand 2005 ; Alcaraz et al. 2007 ; Auger et al. 2014 ; De Madron et al. 2007 ; 2011). Dans le bassin occidentale, la variabilité du zooplancton a été dépendante de la température de l'eau (Molinero et al. 2005 ; Valdes et al. 2007) et du mouvement de convection de la colonne d'eau (Fernandez de Puellas et al. 2007 ; Vandromme et al. 2011). Ce changement a été également associé aux phénomènes naturels tels que le NAO (North Atlantic Oscillation) (Molinero et al. 2008 ; Garcia-Comas et al. 2011). De même, un changement dans la structure des communautés de copépodes a été signalé suite à l'augmentation de la température et de la salinité (Kouwenberg 1998). Dans le bassin oriental, La répartition du zooplancton a été étudiée durant la 1ère campagne océanographique POEM-BC (Siokou-Frangou et al. 1997). Les auteurs ont révélé une différenciation dans le mésozooplancton de la couche de sub-surface en raison des caractéristiques dynamiques du bassin (tourbillons cycloniques et anticycloniques). Conversi et al. (2009) ont mis en relief les variations de l'abondance et de la phénologie des copépodes en fonction du réchauffement climatique et du changement de courant surtout à la fin des années 80. De même, Pancucci-papadopoulou et al. (1992) ont montré que la répartition verticale du zooplancton a été influencée par le régime hydrologique de la zone ; tandis que Isinibilir et al. (2008) ont trouvé qu'elle a été plus contrôlée par les fluctuations environnementales et plus particulièrement la température.

## **Suivi du zooplancton dans la Méditerranée**

Contrairement aux océans Pacifique (Lavaniegos and Ohman 2007) et Atlantique (Licandro et al. 2001 ; Beaugrand et al. 2002 ; David et al. 2005 ; Valdes et al. 2007), les séries chronologiques du zooplancton en Méditerranée ne sont pas nombreuses (Mazzocchi et al. 2007 ; Berline et al. 2012). Selon NMFS-COPEPOD (2009), le nombre est limité à sept stations (Figure 3). Ces séries régulières ont permis de décrire des phénomènes annuels, des anomalies et des

variations interannuelles. La description des stations est résumée dans le Tableau 1. Par contre, plusieurs études temporelles limitées et occasionnelles ont été conduites dans certaines régions de la mer Méditerranée à plus petite échelle (Tableau 2).

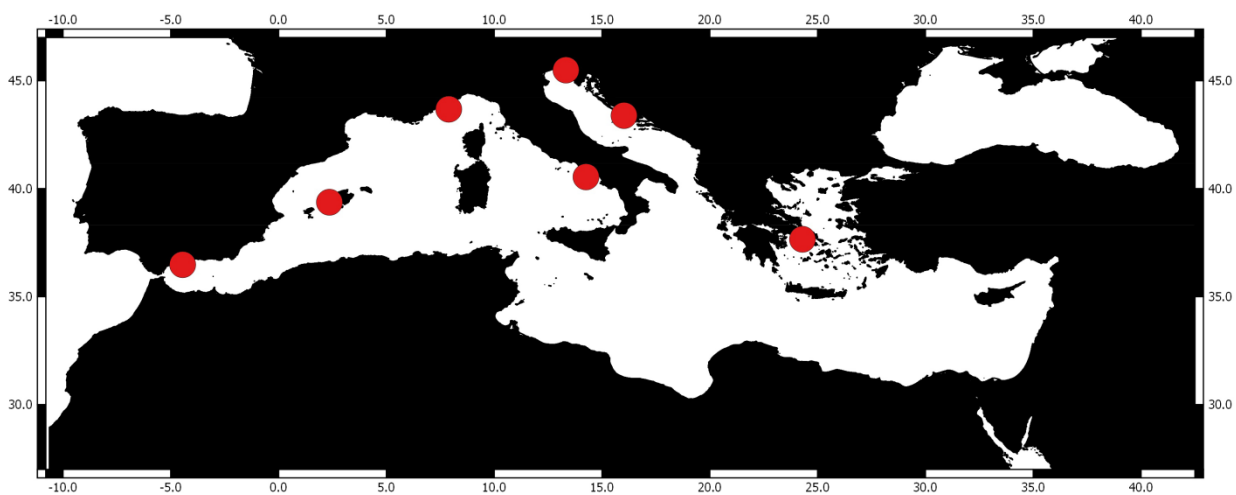


Figure 3 : Carte représentative des séries temporelles du zooplancton existantes dans la mer Méditerranée (selon NMFS-COPEPOD (2009))

Tableau 1 : Caractéristiques environnementales et biologiques des séries temporelles dans la Méditerranée (selon NMFS-COPEPOD (2009)).

Site	Pays	Position	Type de filet	Vide de maille (µm)	Type de trait	Prof. (m)	Période	Fréquence	Référence
<b>Bassin Ouest</b>									
Malaga	Baie de Malaga, Mer Alboran	36°41.76 N 4°24.35E	Bongo double	200	Vertical	28	1992-2000, 2010-présent	trimestrielle	
Baléares	Ile de Mallorca, mer Baléare	39 28 59N 2°25'63E	Bongo-20	250	Oblique	77	1994-2003	10 jours	Fernández de Puellas et al. (2003 ; 2004 ; 2007) ; Fernandez de Puellas and Molinero (2007 ; 2008)
Point B	Villefranche-sur-mer, mer Ligure	43°41'10N 7°19'00E	Juday Bogorov, WP2	330	Vertical	80	1966-présent	Hebdomadaire	Licandro et al. (2006) ; Molinero et al. (2008) ; Garcia-Comas et al. (2011)
Mare Chiara	Naples, mer Tyrrhénien	40°48.5'N 14°15'E	Nansen	200	Vertical	80	1984-présent	Hebdomadaire et bimensuelle	Mazzocchi and Ribiera D'alcalà (1995) ; Mazzocchi et al. (2007 ; 2011)
<b>Bassin Est</b>									
Trieste	Golfe de Trieste, mer Adriatique	45°42.05'N 13°42.6'E	WP2	200	Vertical	18	1970-présent	Mensuelle	Kamburska and Fonda-Umani (2006) ; Fonda-Umani et al. (2004) ; Conversi et al. (2009)
Stoncica	Ile de Vis, mer Adriatique	43°2.63'N 16°17.12'E	Hensen	330	Vertical	100	1959 - présent	Mensuelle	Šolic et al. (1997) ; Marasović et al. (2005)
HCMR station	Golfe de de Saronikos, mer Égée	37°52.37N 23°38.27E	WP2	200	oblique	78	1987-présent	Saisonnière et mensuelle	Siokou-Frangou (1996) ; Christou (1998) ; Siokou-Frangou et al. (2007)

Tableau 2 : Détails de quelques séries temporelles de zooplancton occasionnelles et limitées en mer Méditerranée.

Site	Pays	Type de filet	Vide de maille (µm)	Type de trait	Prof. (m)	Période	Fréquence	Référence
<b>Bassin Ouest</b>								
Golfe de Tigullio	Italie,	Bongo double	335	Vertical	60	1985-1995	bimensuelle	Licandro and Ibanez (2000)
Ile de Ponza	Italie	-	250	Vertical	3000	1975-1979	mensuelle	Scotto di Carlo et al. (1984)
Golfe de Tunisie	Tunisie	WP2	200	Vertical	15	1993-1995	Mensuelle	Daly Yahia (1998) ; Daly Yahia et al. (2004)
						1993- 2008	mensuelle	Daly Yahia et al. (2010)
Baie de Tunisie	Tunisie	Nansen Hensen-egg	55 300	Vertical	2-24	1993- 1995	mensuelle	Souissi et al. (2000)
Marseilles	France	WP2	200	Vertical	200	1992-1195	saisonnière	Gaudy and Champalbert (1998)
Bassin Algérien	Algérie	WP2	200	Vertical	200	1997-1998		Riandey et al. (2005)
Baie de Toulon	France		90	Vertical	10-15	1995-1996	mensuelle	Jamet et al. (2001)
<b>Bassin Est</b>								
Liban		WP2	200	Horizontal et vertical	10-800	1970- 1988	Mensuelle et saisonnière	Lakkis (1990a)
Baie d'Iskenderun	Turquie	WP2	200	vertical	5-15	2009- 2011	saisonnière	Terbiyik Kurt and Polat (2014)
Baie d'Izmit	Turquie	WP2	157	vertical	18-0 / 30-20	2001- 2002	Mensuelle	Isinibilir et al. (2008)

Lattaquié	Syrie	WP2	150	Horizontal	10	1991-1992	Mensuelle	Baker et al. (1994a)
		WP2	200	et vertical		1992-1993	Mensuelle	Baker et al. (1994b)
		WP2	335	Horizontal		2009-2011	Mensuelle	Durgham et al. (2012)

---

L'étude du zooplancton dans les eaux du Levantin et plus particulièrement dans les eaux libanaises est une lacune qu'il faut combler afin de tester la possibilité d'un changement des écosystèmes marins pélagiques accompagnant les changements climatique et hydrologique. Les études du zooplancton ont commencé par des travaux descriptifs et qualitatifs très limités sur la distribution spatiale, saisonnière et temporelle (Lakkis 1982 ; 1990a) pour une courte durée. L'observation de la réponse du zooplancton aux variations environnementales nécessite des longues séries temporelles. Elles nous permettent de suivre l'évolution du système planctonique en fonction des facteurs hydrologiques, des perturbations anthropiques et du changement climatique. Ce chantier est en cours sur les côtes libanaises, où des données sur le plancton sont collectées à une fréquence mensuelle depuis l'année 1999 jusqu'à présent dans une station fixe et permanente. Cette étude est totalement originale dans le contexte actuel qui requiert de mieux comprendre les réponses du plancton aux changements environnementaux. Elles permettront également de comparer les spécificités du fonctionnement des écosystèmes pélagiques du bassin levantin par rapport au bassin occidental de la Méditerranée.

Dans le but d'appliquer des nouvelles méthodologies, on a adopté dans ce travail une nouvelle technologie qui est basée sur un système d'imagerie numérique, rapide et semi-automatique des échantillons de plancton : Le Zooscan. Il permet d'identifier les groupes taxonomiques jusqu'au genre et de traiter un grand nombre d'échantillons dans un temps relativement court, plus rapide que la méthode de dénombrement sous binoculaire. Le Zooscan donne des bonnes estimations et des résultats équivalents à la méthode traditionnelle concernant l'abondance des organismes planctoniques triés dans des grands groupes (souvent l'ordre) (Garcia-Comas et al. 2011).

### **Objectifs et organisation du manuscrit**

Cette présente étude contribue à la connaissance du zooplancton marin de cette zone de la Méditerranée qui reste assez peu connue. On reporte pour la première fois une série chronologique particulière en termes de la durée, du type de filet utilisé et de la cohérence de la stratégie d'échantillonnage permettant l'étude de l'écosystème pélagique dans les eaux libanaises. Les buts principaux de cette thèse sont de :

- 1- Etudier l'évolution globale des facteurs physicochimiques et biologiques à long terme dans les eaux libanaises.
- 2- Décrire les variations saisonnières et interannuelles du zooplancton en fonction des changements environnementaux afin d'identifier le mécanisme sous-jacent qui interagit avec la communauté zooplanctonique.
- 3- Estimer l'impact de ces changements sur la variabilité des populations planctoniques.
- 4- Fournir des informations de base sur le spectre de taille du zooplancton.

Dans ce contexte, ce manuscrit est organisé en six chapitres :

Le **chapitre 1**, comme introduction générale, présente le contexte général de l'étude. Il introduit l'état de l'art du zooplancton, les caractéristiques géographiques et hydrologiques de l'écosystème, l'impact des changements hydrologiques et climatiques sur le plancton et le suivi à long terme en Méditerranée.

Le **chapitre 2**, méthodologique, décrit la zone d'étude, le site d'échantillonnage de la série (point B2 à Batroun) et ses caractéristiques géographiques et environnementales. Il présente également les stratégies, les protocoles et les méthodologies utilisés durant cette étude. Il présente les méthodes d'échantillonnages, les analyses réalisées et les études statistiques effectuées.

Le **chapitre 3** traite la variabilité saisonnière du zooplancton et présente les cycles annuels des facteurs environnementaux et du plancton dans le but de montrer la variation de la structure des communautés planctoniques et la contribution des forçages environnementaux (que ce soit d'origine naturel ou anthropique) dans cette dynamique et de démontrer l'existence d'une succession planctonique.

Le **chapitre 4** s'intéresse à l'étude de la variation temporelle des communautés zooplanctoniques à différentes échelles de temps et souligne les mécanismes responsables de la variabilité correspondante. A une échelle du long terme, les tendances des séries temporelles régulières sont extraites dans le but de détecter une réponse du plancton au réchauffement climatique. A une échelle interannuelle, le changement de l'hydrologie dans la colonne d'eau entre 2005 et 2010 est attribué à l'EMT-like, un phénomène récurrent dans le bassin oriental

chaque décennie, et qui s'est répercuté sur le zooplancton. Ces résultats ont été soumis à la revue *Journal of Marine Systems*. A une petite échelle, des changements ponctuels dus aux apports anthropiques continentaux sont présentés. Deux années ont été sélectionnées, l'année 2003 correspond à une augmentation remarquable du zooplancton tandis que l'année 2010 correspond à une diminution au maximum.

Le **chapitre 5** présente les Spectres de Taille-Biomasse Normalisés (NB-SS) du zooplancton total mesurés automatiquement par le Zooscan. Afin de décrire l'évolution et la dynamique de la structure taille de la communauté du zooplancton, des spectres bruts et des spectres cumulés des fréquences relatives ont été réalisés. Ce chapitre vise à tester si la structure en taille du zooplancton acquise automatiquement permet de révéler les changements observés dans la communauté.

Le **chapitre 6** présente une discussion générale. On expose tout d'abord les limitations du travail. Dans une deuxième partie, on replace nos résultats dans le contexte des écorégions pélagiques définies dans la Méditerranée (D'Ortenzio and Ribera d'Alcalà (2009) ; puis, nous analysons les cycles saisonniers de la biomasse planctonique dans les différentes régions. Dans une troisième partie, on discute l'impact du changement climatique sur la structuration et le fonctionnement de l'écosystème pélagique en Méditerranée d'un côté et l'impact de l'*EMT-like* sur la distribution chlorophyllienne dans le bassin Levantin de l'autre côté.

Enfin la **conclusion générale et les perspectives** closent ce manuscrit en synthétisant les résultats et en évoquant les avancées et les perspectives de ce travail de thèse.



## Chapitre 2 : Matériels et Méthodes

### Situation géographique du Liban

Le Liban, de 10452 Km<sup>2</sup> de superficie, se situe entre les latitudes Nord 33° 03' 38'' et 34° 41' 35'' et les longitudes Est 35° 06' 22'' et 36° 40'. Sa forme est rectangulaire avec une longueur moyenne de 220 Km du Nord au Sud et une largeur de 80 Km au Nord et 48 Km au Sud (CSN 2006). Géographiquement, le Liban occupe la partie centrale des côtes du bassin oriental et s'oriente selon la direction NNE-SSW (Sabbagh 1964).

### Morphologie de la zone côtière

La côte libanaise est décrite par (Sanlaville 1977), comme étant une fine bande très étroite de 3 à 7 km, qui s'étend sur 220 Km de long. Elle présente une orientation générale SSO - NNE et paraît presque rectiligne avec une légère obliquité. Elle s'élargit vers le Nord au niveau de la frontière syrienne et s'annule où la montagne plonge dans la mer (CSN 2006). La zone littorale libanaise rassemble les villes principales et est occupée par une population très dense. Elle est peu accidentée, très ouverte et exposée aux vents dominants du secteur Sud Sud-Ouest.

### Topographie et bathymétrie: un plateau continental étroit

Des relevés bathymétriques réalisés à l'écho-sonde par Plannenstiel (1960) et Emery et al. (1966) révèlent généralement un plateau continental étroit avec une largeur moyenne de 3-5 km jusqu'à l'isobathe 200 m et de 18 km dans la partie Nord qui est caractérisée par le plateau le plus large de la côte libanaise. Cette largeur se rétrécit jusqu'à moins de 3 km dans sa partie centrale et s'élargit de nouveau en descendant de Beyrouth plus vers le Sud jusqu'à 6 à 7 km. La profondeur moyenne du plateau est comprise entre 20 et 40 m (Goedicke 1972) et la pente est parallèle à la côte jusqu'à 1100 à 1400 m de profondeur, distante de 25-30 km de la côte avant d'atteindre la plaine abyssale.

Cela a été confirmé par (Elias 2006) qui a noté la présence d'une isobathe de 100 m située à 8 ou 10 km du rivage du Liban-Sud, à 5 km en face de Damour, à 7 km au Nord de

Tripoli et à plus de 20 Km à l'extrême Nord du pays. Une forte rupture de pente sépare les isobathes de 100 et de 200 m définissant ainsi la limite Ouest du plateau continental. Dans une étude géologique et biogéologique de la région, (Por 1978) a noté que le plateau continental de tout le bassin levantin est en général étroit, de Port Saïd jusqu'aux environs de Haïfa, il continue ainsi tout le long de la côte syrienne. Le fait que le plateau continental soit étroit est un des facteurs physiques contribuant à l'oligotrophie du bassin oriental, ce qui réduit le phénomène de recyclage nutritionnel effectué par une association benthopélagique (Berman et al. 1984).

Jusqu'à présent, aucun relevé bathymétrique complet n'a encore été entrepris au Liban. La structure des fonds marins de la côte est très mal connue et à peine étudiée. Une étude récente a été réalisée sur des zones de profondeur supérieure à 100 m par la campagne océanographique SHALIMAR en 2003 en utilisant l'écho-sonde à multifaisceaux Simrad EM-300.

## **Zone d'étude**

La zone d'étude se situe au large de Batroun province localisée à 55 km au Nord de la capitale Beyrouth où la majorité de ces habitants exploite les ressources marines. En général, la côte est très ouverte à la mer et ne présente aucun phénomène naturel extraordinaire. Cette région se caractérise par la présence de deux sources d'apports continentaux et terrigènes affectant l'écosystème pélagique, à préciser: la rivière d'Al-Jaouz et le complexe d'engrais chimique de Selaata au Nord de Batroun. Dans cette présente étude, on s'intéresse à l'étude de l'effet de ces deux sources sur le zooplancton marin.

### **Présence de l'embouchure de la rivière Al-Jaouz**

Cette rivière prend sa source des montagnes et parcourt une distance d'environ 30 km. Elle présente un intérêt biogéographique assez important puisqu'elle passe près de terrains industriels (usine de production d'électricité, usine de production de boisson et essentiellement agricoles ; d'où sa richesse en nitrate. La masse des nitrates déversée annuellement dans les eaux marines de la région est estimée à  $270.10^7 \mu\text{atg}$  (Abboud-Abi Saab et al. 1999-2002). La rivière d'Al-Jaouz est un parmi les 17 cours d'eau permanents au Liban et se caractérise par un régime méditerranéen et un rythme saisonnier typique alternant deux périodes : i) de hautes eaux, en hiver saison des pluies et au printemps lors de la fonte de neige et ii) de sécheresse en été et en

automne. Selon le service d'hydrologie de l'office National du Litani, le volume annuel écoulé est de  $48.12 \text{ M.m}^3$  recueillis à l'embouchure, ayant un débit de  $2.84 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Tableau 3).

Tableau 3 : Les volumes mensuels écoulés à l'embouchure de Rivière Al-Jaouz, Batroun d'après Khair et al. (1992)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Volume ( $\text{M.m}^3$ )	4.66	18.178	9.99	10.938	0.632	1.125	0.185	0.00	0.005	0.035	0.018	2.354

### Complexe d'engrais chimique de Selaata

C'est une usine de fabrication d'engrais chimiques phosphatés mise en fonction depuis 1975 et considérée comme une des plus grandes sociétés industrielles au Liban. Construite au bord de la mer, cette industrie est localisée dans la banlieue Nord de la ville de Batroun à 400 m au Nord de Rivière Al-Jaouz. Sa production annuelle dépasse les 400 millions de tonnes de produits divers citons le simple superphosphate (pour une production annuelle qui s'élève à  $230.10^3$  tonnes), le triple superphosphate ( $\sim 31.10^3$  tonnes), l'acide phosphorique ( $>160.10^3$  tonnes) (Al-Hajj and Muscat 2000). L'usine de Selaata utilise  $\sim 1.5.10^3$  tonnes de roches de phosphates (phosphate tricalcique) par jour comme minerai utilisé dans la fabrication du fertilisant simple superphosphate et triple superphosphate. Le phosphogypse est le déchet majeur du traitement du phosphate en plus de l'acide phosphorique et de l'acide sulfurique qui sont versés directement dans l'eau de mer juste à côté sans aucun traitement (Abboud - Abi Saab and Atallah 1996).

### Choix de la station étudiée

Le site d'étude est une station fixe B2 de coordonnées N  $34^\circ 14.856$  ; E  $35^\circ 36.067$  (Figure 4), située au large face à la ville de Batroun à  $\sim 4$  milles de la côte (soit  $\sim 6 \text{ Km}$ ) sur des fonds de 500 m. Au fait de la morphologie de la côte caractérisée par un plateau continental étroit, ce point a été choisie pour être généralement représentatif des eaux du large. Cependant, il ne semble pas assez éloigné ni protégé de toute action directe des rejets terrestres, en particulier du panache de la rivière d'Al-Jaouz et des décharges de l'usine de Selaata durant les conditions

météorologiques extrêmes (Abboud-Abi Saab et al. 2010). Cette station étudiée sur le long terme est donc convenable pour les études écologiques visant à distinguer les événements rapides suite à des crues, les cycles saisonniers et l'évolution long terme des populations planctoniques. L'échantillonnage en ce point a débuté en juin 1999 et s'est poursuivi jusqu'au avril 2014 avec une fréquence mensuelle presque régulière avec quelques interruptions dépendant des contraintes logistiques et politiques. Dans ce travail de thèse, les années 1999 et 2014 ont été éliminées car elles étaient incomplètes et ne couvraient que la moitié de l'année.

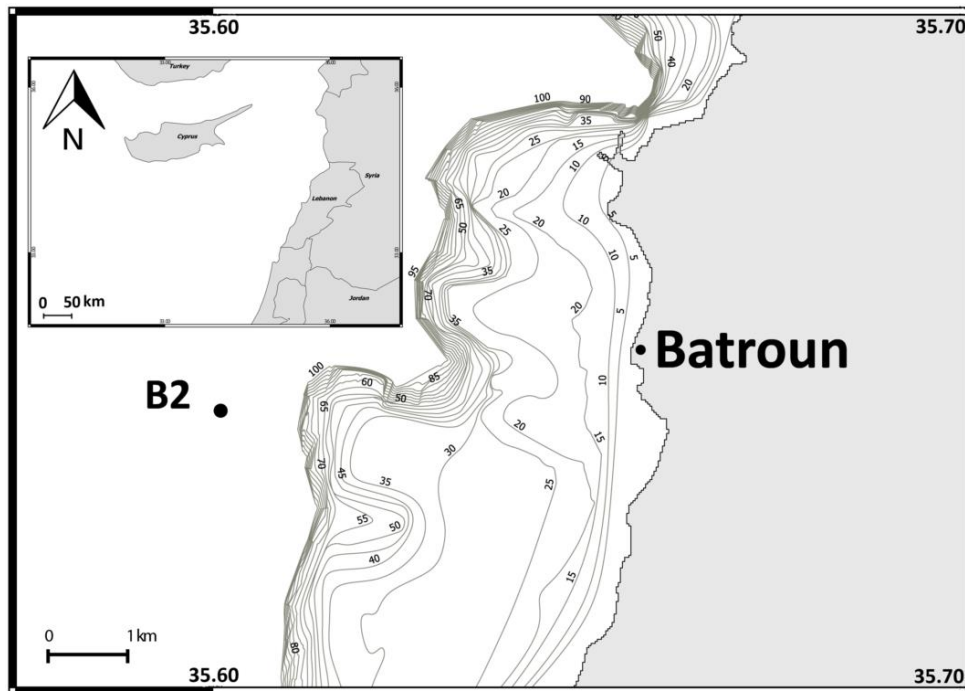


Figure 4 : Carte qui représente le site d'échantillonnage B2 dans la région de Batroun, Liban.

Les jours de l'échantillonnage ont été choisis au milieu de chaque mois en utilisant un petit bateau de pêche artisanale. Les prélèvements des organismes en mer ont été effectués à la main et à l'aide d'un simple filet de 40 cm de diamètre et de 52 microns de vide de maille (Figure 5), en des traits verticaux pour la couche de surface allant de 60 m jusqu'à la surface (0 m). Ce type de filet est formé d'une surface conique filtrante de 80 cm de longueur munit à un collecteur de même vide de maille. Les échantillons ont été fixés immédiatement, à bord, avec de formol dilué à 5% neutralisé par le borax. Le filet a été déployé à la main depuis le bord du bateau à l'aide d'une corde graduée. Le volume de filtration de chaque trait était  $\sim 7.8 \text{ m}^3$ , estimé

à partir de l'aire de l'ouverture du filet (0.13 m<sup>2</sup>) et de la profondeur de la colonne d'eau (60m). L'équation finale est résumée par la suivante :

$$\text{Volume d'eau traversé} = \pi * r^2 * h$$

Où,  $\pi = 3.1416$ ,  $r$  = rayon du filet (m),  $h$  = hauteur de la colonne (m)



Figure 5 : Filet 52 microns.

En même temps et à l'aide d'une bouteille Niskin d'une contenance de 10 litres équipée par un thermomètre renversé, l'eau de mer a été prélevée à six profondeurs pour la station B2 (0, 20, 40, 60 et 80 mètres) et ramenée aux laboratoires pour les analyses biologiques et hydrologiques (température, salinité, phosphates, nitrates, nitrites). En plus, des échantillons ont été recueillis par la bouteille Niskin pour l'étude des cellules phytoplanctoniques en surface, à 20, 40 et 60 m de profondeur.

Les échantillons issus de la bouteille étaient préservés à bord dans une glacière portative pour être analysés aux laboratoires du Centre National des Sciences Marines (CNSM)-Conseil National de Recherches Scientifiques Liban (CNRSL). Les échantillons planctoniques de filet,

formolés et préservés ont été amenés au Laboratoire Océanologique de Villefranche-sur-Mer (LOV-France) pour être analysés sur le Zooscan.

## **Analyses hydrologiques**

Les paramètres hydrologiques mesurés dans chaque sortie sont la température et la salinité. Les mesures de la température ont été faites avec un thermomètre à renversement de type Richter et Wiese (de précision 0,05 °C), celles de la salinité ont été déterminées par un salinomètre de type Beckman (model RS7-C). En parallèle, un capteur Andraa Sensor Model 3230 (température de -8 à 41 °C; précision 0,01 °C; résolution 0,005 °C ; pression 0 à 11 bar, 0,2% de la mesure) a été utilisé pour un profil de 100 m avec des mesures tous les 5 m. Durant les premières années d'étude jusqu'au fin 2003, les niveaux 0, 40 et 60 m ont été pris en considération et on a ajouté ultérieurement les niveaux 20 et 80 aux profils.

L'analyse des données de toute cette série a été basée sur les mesures prises avec le thermomètre à renversement et sur la méthode potentiométrique pour toutes les profondeurs. On a estimé les valeurs manquantes au début de la série, des profondeurs 20 et 80 m, à partir du CTD. Des régressions linéaires avec leurs intervalles de confiance ont alors été dressées pour les températures (Figure 6 A) et les salinités (Figure 6 B) pour l'inter-estimation. L'équation linéaire calculée entre la température issue du thermomètre renversé et celle issue de Niskin (le ratio CTD/Thermomètre renversé) était  $y = 0.959x + 0.8128$  et  $R^2 = 0.9503$ . Celle calculée pour la salinité déterminée à partir du salinomètre en fonction de celle du CTD (le ratio CTD/salinomètre) était  $y = 0.7511x + 9.7689$  et  $R^2 = 0.4304$ . L'inventaire des sorties réalisées est dressé dans le tableau de l'annexe 1.

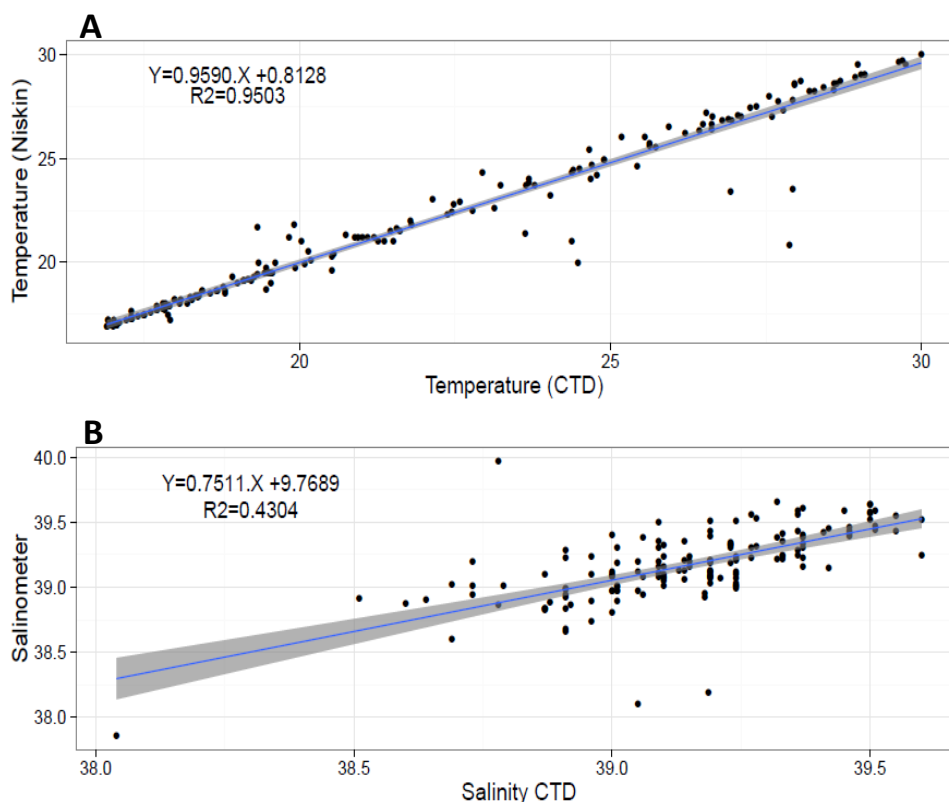


Figure 6 : Relation linéaire entre les estimateurs. (A) température (°C) mesurée par le thermomètre renversé (axes des x) et celle mesurée par le CTD (axes des y), (B) salinité mesurée par le salinomètre (axes des x) et celle mesurée par le CTD (axes des y). Les paramètres chaque régression linéaire ( $\pm$  intervalle de confiance) sont présentés. Chaque point correspond à une mesure.

## Traitement des échantillons

Le dosage des sels nutritifs a été effectué par spectrophotométrie, utilisant le spectrophotomètre Thermo spectronic Hellios.

### Dosage des orthophosphates

A bord, les échantillons sont recueillis dans des bouteilles en polyéthylène de 250 ml et placés dans une glacière portative. Ils seront congelés à  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  dès le retour au laboratoire jusqu'à l'analyse. Ensuite, les orthophosphates (essentiellement sous forme de  $\text{PO}_4^{-3}$  (10%) et  $\text{HPO}_4^{-2}$  (90%) dans l'eau de mer) sont dosés selon la méthode de Murphy and Riley (1962). Cette méthode consiste à ajouter à l'échantillon du molybdate d'ammonium qui réagit avec les ions de phosphates pour former un complexe qui à son tour sera réduit par l'acide ascorbique. La

réaction de réduction se fait en présence d'un catalyseur, l'antimonyl tartrate (antimoine III). La forme réduite à une coloration bleue qui sera absorbée au maximum à la longueur d'onde  $\lambda=885$  nm.

### **Dosages des nitrates et nitrites**

Pour l'analyse des nitrates, les échantillons sont recueillis dans des bouteilles en polyéthylène de 500 ml de volume et mis dans la glacière portative au bord du bateau. Ces bouteilles sont aussi congelées à  $-20^{\circ}\text{C}$  dès le retour au laboratoire de chaque sortie. La méthode consiste à doser les ions de nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ). En fait, on dose la somme des ions  $\text{NO}_2^-$  et  $\text{NO}_3^-$  ensemble puis par une réaction de réductions on obtient les ions  $\text{NO}_2^-$ , qui soustraits du total, nous donne la concentration en ion  $\text{NO}_3^-$ . Selon Wood et al. (1967), la réduction s'effectue par passage de l'échantillon sur une colonne de cadmium traité au cuivre.

Les ions de nitrites sont dosés par la réaction de Griess, appliquée à l'eau de mer par Bendshneider and Robinsons (1952). Cette méthode consiste à ajouter à l'échantillon de la sulfanilamide qui en milieu acide ( $\text{pH} < 2$ ), forme avec les ions de nitrites un diazoïque. Ensuite, ce dernier réagit avec le N-naphtyl-éthylènediamine pour former le colorant rose qui est absorbé à la longueur d'onde de 543 nm.

### **Estimation de la biomasse chlorophylle-*a* de surface**

La concentration totale de la chlorophylle-*a* (chl-*a*) en surface a été extraites du satellite SeaWiFS jusqu'à juin 2002 et du MODIS Aqua images au-delà de cette date, en utilisant une fenêtre spatiale de 9 km et une fenêtre temporelle de 8 jours autour du point B2 et au niveau du bassin Levantin (<http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/index.html>).

### **Comptage du phytoplancton**

Les échantillons d'eau destinés à l'étude qualitative et quantitative des populations phytoplanctoniques ont été recueillis dans des flacons en verre de 250 ml et fixés immédiatement à bord au lugol (5%). Au laboratoire, le comptage a été effectué au microscope inversé en suivant la méthode d'Utermöhl (1958) qui consiste à sédimenter l'échantillon dans un tube de 50



ou 100 ml selon la turbidité. Les cellules microphytoplanctoniques (diatomées et dinoflagellés) ( $>20\ \mu\text{m}$ ) ont été comptées par espèces dans une surface dépendante de la densité des cellules. Les cellules nanoplanctoniques (entre 2 et  $20\ \mu\text{m}$ ) ont été comptées par groupes.

### **Analyses au Zooscan**

#### **Description de l'appareil**

Le Zooscan (Figure 7) est un appareil scanner, a été créé et développé au Laboratoire d'Océanographie de Villefranche-sur-Mer (LOV) par l'équipe de Gabriel Gorsky. Ce système d'imagerie numérique est breveté par le CNRS français.

Cet appareil permet de visualiser et de numériser rapidement un échantillon liquide contenant du zooplancton ([www.zooscan.com](http://www.zooscan.com)). Il est considéré comme une excellente méthode analyser les séries temporelles, il permet de compter, d'identifier semi-automatiquement les organismes planctoniques et de même, de mesurer leur taille (Gorsky and Grosjean 2003 ; Grosjean et al. 2004 ; Gorsky et al. 2010). Il se distingue des autres types de scanner classiques par sa capacité d'analyser des images digitales avec une très bonne précision (de 4800 dpi) et pour une courte durée de temps (Gorsky et al. 2010). De même, il se singularise par la répartition d'un système de luminosité spéciale, par suite d'une distribution des LEDs sous la vitre du scanne pour optimiser la lumière lors de la numérisation et de la maintenir constante et équilibrée (Grosjean et al. 2004).



Figure 7: Zooscan de type (hydroptic V3 window 7)

### Préparation des échantillons

Le nombre total des échantillons de la série était de 175 (Figure 8) et à l'aide d'un "Folsom's Plankton Sample Divider", chaque échantillon a été divisé en deux moitiés dont une a été consacrée pour l'étude sur le Zooscan à Villefranche-sur-mer.

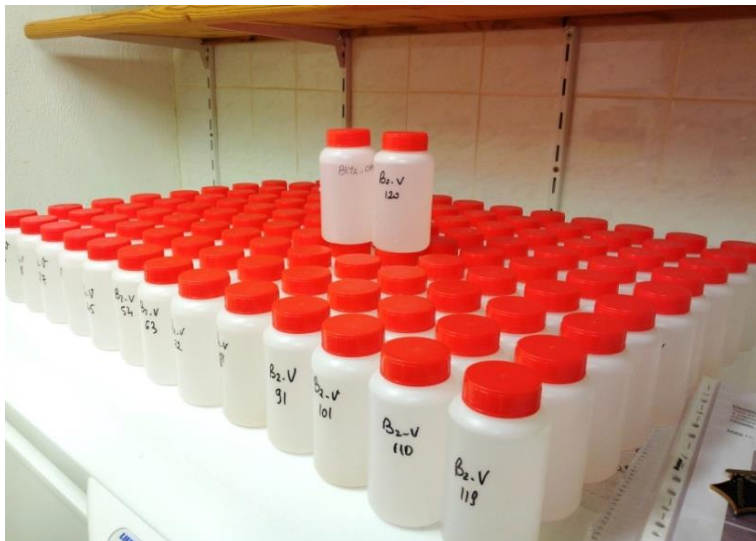


Figure 8: Série d'échantillons de dix ans collectée à Batroun

Afin de bien représenter et imager les organismes sur le Zooscan, la méthode suivie pour la préparation des échantillons est celle décrite par Gorsky et al. (2010) et Garcia-Comas and Picheral (2013). Il sera tout d'abord utile d'éliminer le formol de l'échantillon sous la hotte et de

préparer les organismes pour la phase de séparation suivante. Cette dernière consiste à trancher l'échantillon en 2 subdivisions en fonction de la taille. Alors à l'aide des tamis de 150 et 50 microns, les organismes de grande taille sont récupérés et séparés de ceux des petites tailles afin de bien les numériser et de minimiser les erreurs. Une fraction d1 de grande taille comprendra les individus dont la taille est supérieure ou égale à 150  $\mu\text{m}$  et une fraction d2 comportant les individus ayant la taille entre 50 et 150  $\mu\text{m}$ . Cette étape est essentielle pour compter proprement les individus de petite taille, pour détecter ceux rares et masquer par les autres de taille plus grande. Ensuite, à l'aide d'une boîte de Motoda (Figure 9) (Motoda 1959), ces fractions sont divisées en des aliquotes (1/2, 1/4, 1/8, 1/16, etc.) selon la densité afin de contenir approximativement de 1000 objets/scan. Chaque fraction est analysée séparément au Zooscan (Figure 10).



Figure 9: Boîte de Motoda

Tout d'abord et au début de chaque projet, il faut régler le Zooscan et réaliser des calibrations afin d'établir un protocole pour le traitement des échantillons en routine et pour le gain de temps. D1 l'aliquote destinée à l'analyse, est versée dans la cuve du Zooscan, limitée par le cadre en plexiglas de type "narrow". Ce cadre déposé sur la vitre du scanner, correspond à la dimension du scan. Il permet de disposer et de rassembler les organismes dans la cellule de numérisation du Zooscan et d'obtenir des images de la frontière d'une bonne qualité (Gorsky et al. 2010). On rajoute de l'eau potable à température ambiante jusqu'à un niveau indiqué sur le cadre pour éviter la formation de bulles d'air. Les organismes sont minutieusement écartés les uns des autres et éloignés de la paroi du cadre manuellement à l'aide d'une fine pointe de cactus,

afin d'éviter la hachure de la vitre en verre. Cette séparation permet une bonne distribution des organismes bien espacés dans la cellule et d'éviter leur superposition et leur assemblage. Le logiciel les identifie comme un seul et même individu et nous aurons donc une sous-estimation du nombre des particules et une sur-estimation de leurs tailles, ce qui perturberait l'identification.

En effet, les analyses fournis par le Zooscan reflètent des mesures très précises de la taille du corps, aboutissant aux spectres de taille. Il faut patienter dans cette étape critique. Plus on sépare les objets et on dépose ceux flottants à la surface, plus on aura des données de bonnes qualités et on évitera la présence des images flous et nuageuses et par la suite de biaiser les mesures de taille des organismes flottants. Une fois l'échantillon est traité et scanné, il est récupéré grâce au pivotement du support table de 45° afin de vider la cellule, reconcentré par filtration, rincé à l'eau douce puis conservé et reconditionné dans un flacon d'eau formolée à 5% de nouveau.

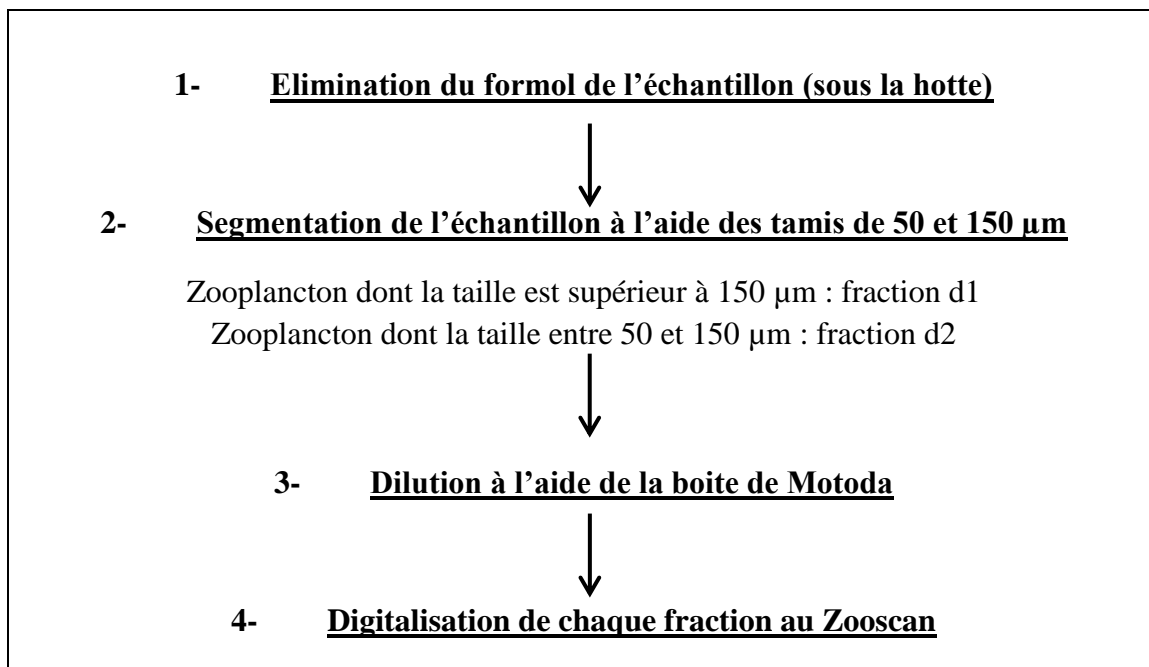


Figure 10 : Schéma résumant les différentes étapes de la préparation d'un échantillon avant sa numérisation à l'aide du Zooscan

### Protocole de travail de Zooscan et Traitement des images

C'est crucial de débiter à chaque fois la numérisation des échantillons par un test à blanc (background) pour examiner et tester la performance de Zooscan et pour s'assurer de la propreté de la vitre en cas de présence de tout défaut imprévu. Une fois la phase de séparation achevée, on complète la numérisation des organismes à l'aide du logiciel Zooprocess (développé sous Image J) couplé au pilote du scanner *Vuescan*. Une prévisualisation de l'image doit être tout d'abord effectuée afin de vérifier l'homogénéité de la lumière et le contraste du système Zooscan en enregistrant les ombres des objets qui se reposent sur le fond. Une fois l'échantillon est scannée, l'image sera automatiquement mémorisée et archivée avec toutes les données et les informations couplées à chaque échantillon. Alors une image *.tif*, un fichier log *.txt* et un fichier meta *.txt* seront créés pour chaque échantillon dans un document de notre projet sur C:/Zooscan\_projet/Zooscan\_scan/\_raw. Les fichiers log enregistrent des informations portant sur la méthodologie du scan, tandis que ceux du meta nous donnent des informations sur la méthode d'échantillonnage (le site d'échantillonnage, le type du filet utilisé, le volume filtré, la profondeur, etc...) et sur l'échantillon préparé lui-même (nombre de dilution de chaque fraction, etc...). Le traitement des images raw déjà scannés est recommandé à la fin de chaque jour en lançant le mode *process* des images. Par la suite, des fichiers PID seront créés automatiquement sous le nom de "nom\_echantillon\_dat1.pid" dans le sous-dossier PID\_Results. Ces fichiers contiennent des tableaux portant toutes les informations pour chacun des objets de l'échantillon scanné et seront utilisés dans les différents traitements numériques ultérieurs de données.

Chaque vignette et fichier correspondant à un objet, sont sauvegardés et référencés dans un répertoire propre à l'échantillon analysé. Ces informations serviront après pour la reconnaissance des objets. En fait, la surface des individus est représentée par un nombre de pixel, ce dernier est équivalent à un carré de 5.28  $\mu\text{m}$  de côté. Puisque les échantillons sont digitalisés à une résolution optique de 4800 dpi, avec cette résolution, on obtiendra des images de très haute qualité. L'analyse des images, dépendant du niveau de gris des pixels, se fait à un certain seuil. L'Equivalent Spherical Diameter ou ESD qui correspond à la surface de l'objet mesuré est réglé à une limite de taille minimum de 300  $\mu\text{m}$ . A partir de ce niveau, l'identification et la mesure des particules auront eu lieu. Cette principale limite technique de l'appareil provient de la résolution

de l'image et donc de la taille du pixel, qui ne permettent une reconnaissance des particules qu'au-delà de 0.3 mm d'ESD.

A ce stade, 48 variables morphométriques ont été calculés pour chaque objet/particule. L'identification automatique et la classification des organismes en des groupes taxonomiques seront succédées via le programme *Plankton Identifier* (PKID) ([http://www.obsvlfr.fr/~gaspari/Plankton\\_Identifier/index.php](http://www.obsvlfr.fr/~gaspari/Plankton_Identifier/index.php)) (Gasparini 2007) couplé au logiciel de statistique *Tanagra* (<http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/tanagra/fr/tanagra.html>) (Rakotomalala 2005). Le *Plankton identifier* est capable à identifier les objets sous forme les vignettes d'une façon automatique. Il comprend parmi ses fonctions de base, la phase de l'apprentissage ou le "learning set", qui constitue une référence pour les algorithmes de reconnaissance afin de bien reconnaître les espèces présentes dans l'échantillon, de les identifier d'une façon automatique, de prédire à quelle classe elles appartiennent et de fournir toutes les données et les informations associées.

En général dans cette étape, on classe manuellement une à une, un certain nombre des vignettes parmi 1000 déjà sélectionnées au hasard de la séries par le PKID, que l'on insère dans le dossier correspondant (Gorsky et al. 2010). Ces vignettes représentent le nombre d'individus dans les groupes taxonomiques définis. Il est important d'avoir un nombre de vignettes semblable dans chaque dossier afin de ne pas favoriser une classe dans la reconnaissance. Tester le training-set au début de l'évaluation et de la prédiction est essentiel dans cette routine. Pour cela, une méthode d'analyse statistique, le Random forest (Breiman 2001) a été utilisé par le *Tanagra* de *Plankton Identifier* conçu pour la méthode d'apprentissage. Elle consiste à rechercher les bonnes correspondances entre 48 paramètres morphométriques mesurés sur chaque vignette et ceux obtenus dans chaque catégorie (Grosjean et al. 2004). Selon Gorsky et al. (2010), cette méthode nous donne les meilleurs résultats concernant les études des séries de zooplancton. Mais malgré la différence dans la méthodologie de l'échantillonnage et dans les caractéristiques des échantillons, le learning set utilisé pour la reconnaissance de notre série étudiée dans les eaux libanaises est celui suivi par Vandromme et al. (2011) (Figure 11). En effet, on a trouvé que ce training set a bien représenté les populations trouvées et nous confie une reconnaissance plaisante et serviable.

Une fois l'identification automatique complétée, on se trouve dans la dernière phase, la phase de la validation. Il serait alors fondamental de corriger manuellement les vignettes mal identifiées et classées par le PKID afin d'obtenir un classement plus exacte, d'où le terme d'identification "semi-automatique" (Gorsky et al. 2010). Cette étape de validation manuelle du pré-tri automatique est essentielle pour améliorer la résolution taxonomique du jeu de données. Le *Xn view* un autre logiciel, nous permet de perfectionner le reste de ce travail, de gérer plus facilement le triage et de les remettre dans leurs propres groupes. La méthodologie suivie a permis de mesurer de manière homogène et cohérente le plancton sur un intervalle de taille supérieur à 3  $\mu\text{m}$ , de séparer et d'exclure les objets non-planctoniques et non vivants.

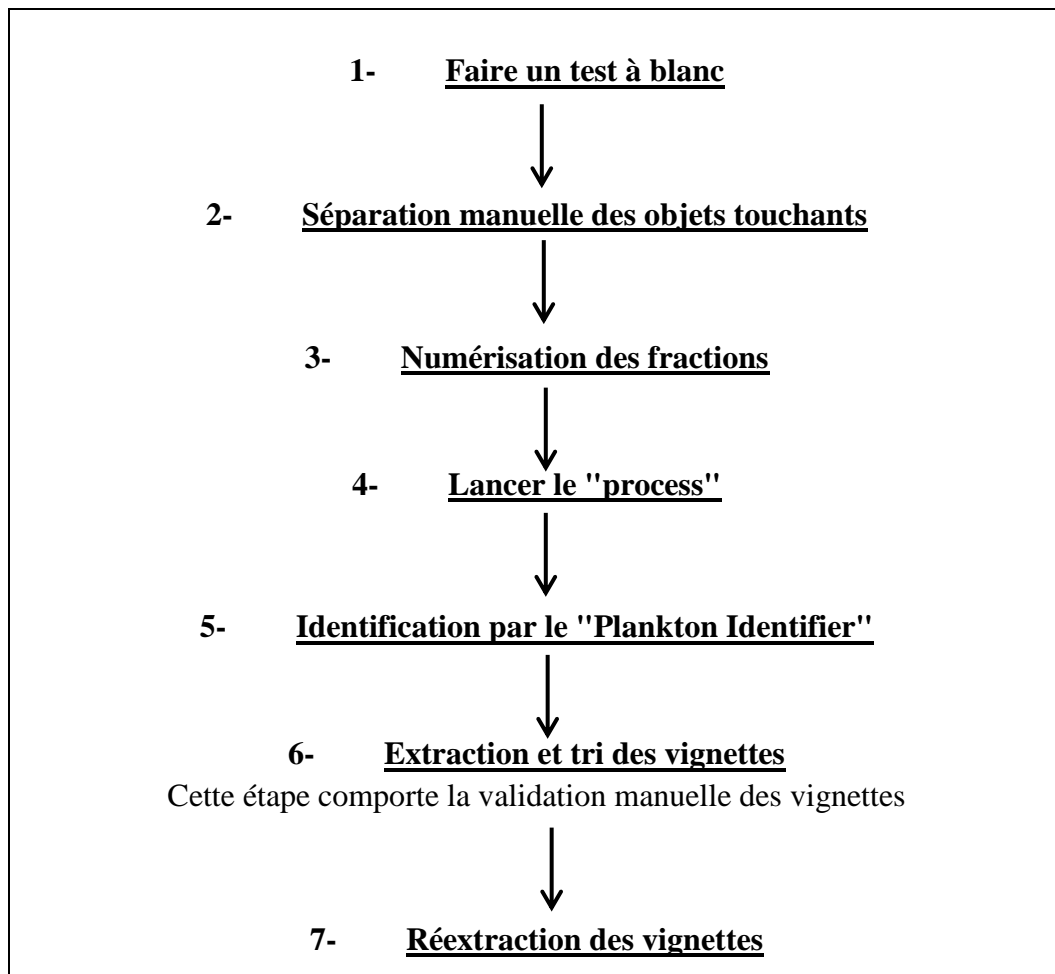


Figure 11 : Schéma résumant les différentes étapes de la numérisation d'un échantillon à l'aide du Zooscan

D'après la classification automatique, on a pu arranger 34 catégories desquelles on a séparé les 29 catégories de plancton à différents niveaux de résolution taxonomique des non vivants (Tableau 4).

Tableau 4 : Liste des 34 groupes d'objets établie après une identification visuelle sur les images digitalisées de la série temporelle du point B2.

Groupe	Remarques – Description
Annelids	Annélides
Appendicularians	Appendiculaires
Chaetognaths	Chaetognathes
Cladocerans – <i>Evadne</i>	<i>Evadne</i> spp
Cladocerans – <i>Penilia</i> .	<i>Penilia</i> sp
Copepods N.D.	Tous les copépodes non identifiés
<i>Oithona</i> spp	
<i>Acartia</i> spp	
<i>Calanus</i> spp	
Harpacticoids	
<i>Oncaea</i> spp	
<i>Corycaeus</i> spp	
<i>Temora</i> spp	
Copepods-multiples	2 ou plusieurs copépodes collés
Cirripedia larvae	Larves cirripèdes
Euphausiids larvae	Larves euphausiacés
Nauplii larvae	Larves nauplii
Echinoderm larvae	Larves d'échinodermes
Eggs	Œuf de poissons divers et tout ce qui est typiquement rond de tailles différentes
Foraminifera	Foraminifères
Gelatinous – jellyfish	Hydroméduses
Gelatinous – thaliacans	Thaliacés
Gelatinous – siphonophores	Siphonophores



Moll – <i>limacina</i>	<i>Limacina</i> spp
Multiples	2 ou plusieurs individus collés/touchants
Other	Zooplankton non identifié et larve de poisson
Crust - other	Crustacés non identifiés
Pteropods	Ptéroscopes
Ostracods	Ostracodes
Bad – focus	Objets flous
Bubble	Bulles d'air
Detritus – aggregates	Débris, agrégats
Detritus – aggregates – dark	Débris, agrégats
Detritus - fiber	Fibres

## Contrôle qualité des données obtenues par le Zooscan

Afin de vérifier l'homogénéité du set de données et de métadonnées (information sur la collecte et le traitement) de zooplankton, on a procédé à une étape de contrôle qualité. Au cours de cette étape, les paramètres de qualité pour chaque échantillon sont visuellement représentés.

Tous les échantillons analysés dans cette thèse ont été prélevés d'un seul point fixe B2 avec une homogénéité dans la méthodologie de l'échantillonnage (Figure 12 et Figure 13). L'échantillonnage de la série a été effectué correctement dans le même point fixe ayant des caractéristiques qualitatives (nombre de pêche pour chaque échantillon, type du filet, taille de la maille et aire du filet) et quantitatives (latitude, longitude, profondeur du fond, profondeur maximal et minimale de l'échantillonnage, volume filtré) fixes et identiques: la même latitude (Figure 12 A) et longitude (Figure 12 B), la même profondeur de 500 m (Figure 12 C), le même nombre de pêche pour chaque échantillonnage (Figure 12 D) avec le même type de filet (Figure 12 F, G), pour le même type de trait (Figure 12 E, H, I). Bien qu'un volucompteur n'ait pas été utilisé dans cette série, le volume d'eau filtré théorique calculé a été identique pour toute la série (Figure 12 J). Globalement, les métadonnées sont homogènes dans toute la série étudiée et sont consistantes.

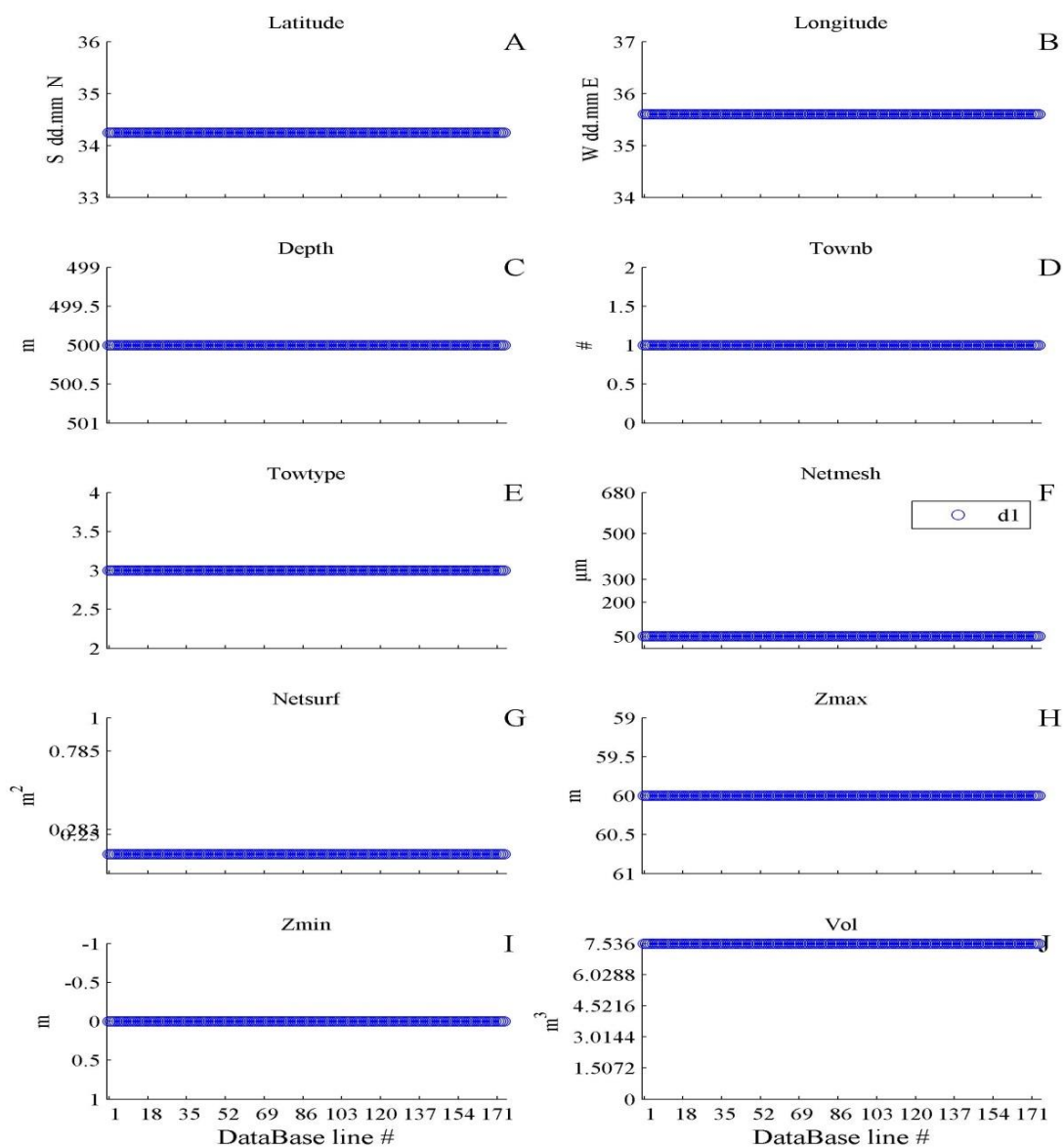


Figure 12 : Metadata de la fraction d1 de la série temporelle. **A)** Latitude, **B)** Longitude, **C)** profondeur, **D)** Nombre de pêche, **E)** Type du filet (3= filet vertical), **F)** taille de la maille, **G)** aire du filet, **H)** profondeur maximale de l'échantillonnage, **I)** profondeur minimale de l'échantillonnage, **J)** Volume filtré.

Durant la phase de scanne, tous les échantillons de l'année 1999 jusqu'à 2014 ont été effectués en utilisant le même appareillage, le Zooscan du type «Hydroptic V3» et suivant le même protocole de méthodologie. La grande fraction d1 de tous les échantillons de la série et la seule prise en considération, a été fractionnée en utilisant le même tamis de 150  $\mu\text{m}$ .

Au début et à la fin de la série, le nombre d'objet dans chaque fraction a été supérieur à 2000 objets/scan. Les 6 premiers échantillons ont été traités à un ESD de 0.1  $\mu\text{m}$ , ceux à partir de l'échantillon numéro 147 ont été traités à un ESD de 0.15. La sélection des organismes de taille supérieure à 0.3, qui nous intéressent le plus, a été opérée ultérieurement dans l'étape d'extraction des vignettes. Pour tous les autres échantillons de la série, le nombre d'objets scannés était plus ou moins homogène, aux alentours de 1000 objets/scan (Figure 13).

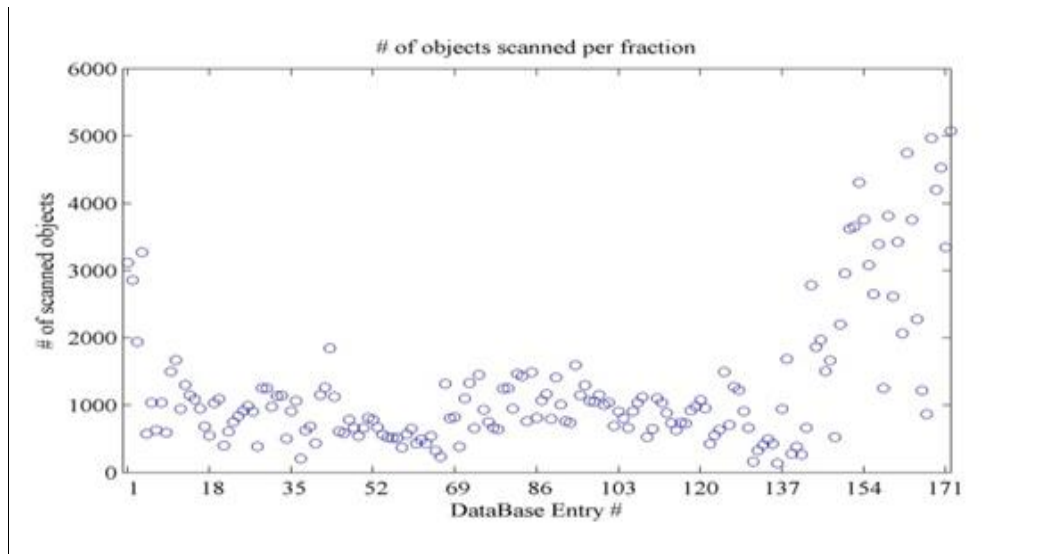


Figure 13: Nombre des objets scannés de la fraction d1 pour toute la série temporelle au point B2.

Les abondances (Figure 14 A) et les biovolumes (Figure 14 B) de l'ensemble du zooplancton de chaque échantillon ont montré une distribution plus ou moins régulière tout au long de la série avec une petite augmentation des abondances au milieu de la série.

Les spectres de taille obtenue grâce aux mesures automatiques du Zooscan ont présenté tous le même profil (Figure 14 C). Le principe se repose sur l'observation empirique que le nombre d'organismes décroît en fonction du logarithme de leur taille avec une pente constante

(Sheldon et Parsons, 1967). Le plancton a présenté une abondance maximale dans une gamme de petites classes de taille.

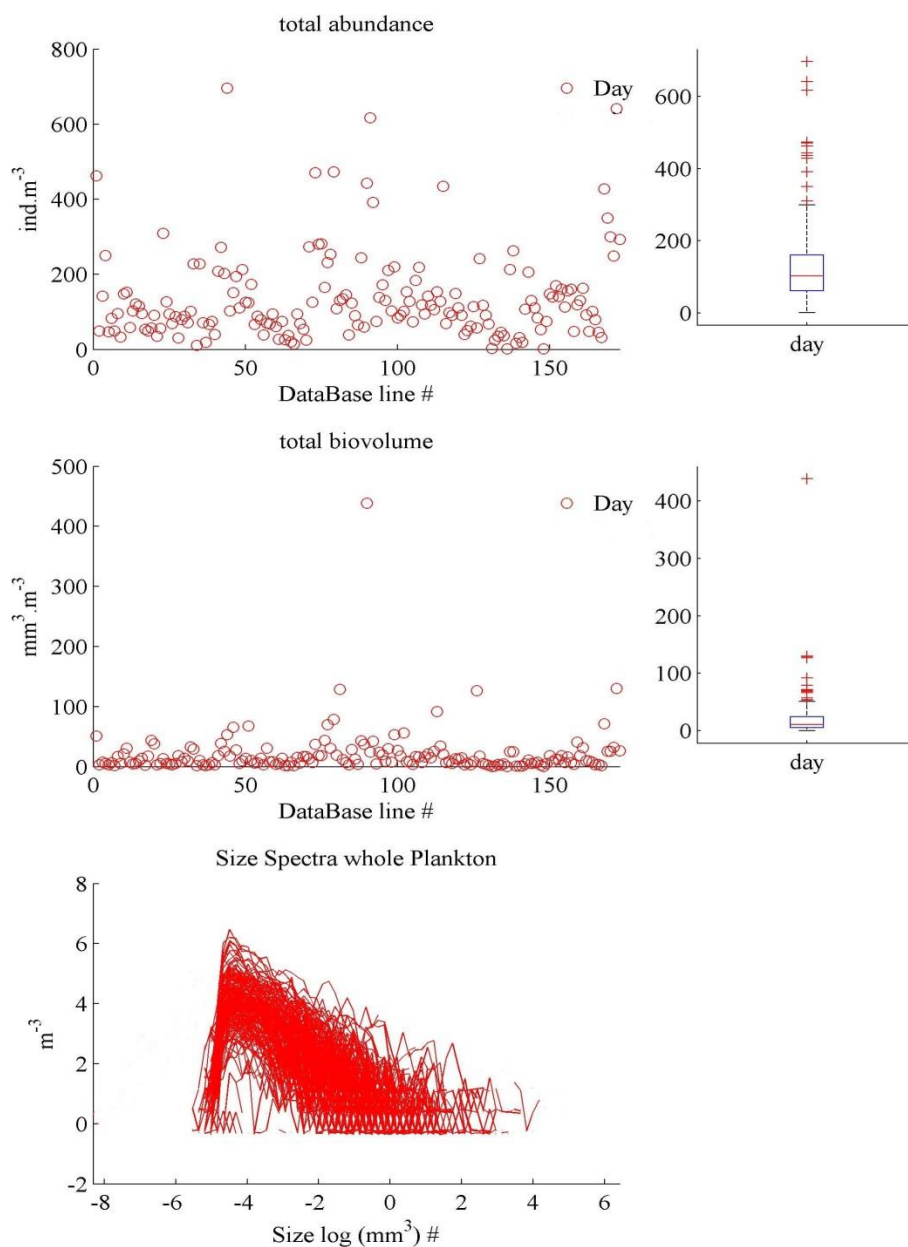


Figure 14: A) Série des abondances (ind.m<sup>-3</sup>), B) des biovolumes total (mm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) et C) des spectres de taille du zooplancton total.

## Elimination de la petite fraction d2 de l'analyse

Le but de fractionnement en deux fraction de taille d1 et d2 était de compter correctement les individus les plus petits et de représenter les organismes rare. Mais la pratique a montré que la fraction d2 était vide d'organisme et qu'ils étaient peu identifiables. Au début de la série, les deux fractions de taille (d1 et d2) de chaque échantillon ont été scannées par le Zooscan avec un ESD seuil défini de 0.3  $\mu\text{m}$ . La fraction d2 qui représentait les organismes de petite taille entre 50  $\mu\text{m}$  et 150  $\mu\text{m}$  et donc inférieure à ce seuil a été seulement digitalisée jusqu'à 2004 (au nombre de 55 images). Tandis que toutes les fractions de d1 (>150  $\mu\text{m}$ ) ont été scannées (au nombre de 175 images).

La comparaison entre l'abondance de l'ensemble de zooplancton déterminée par le Zooscan et issue des deux fractions d1 et d2 est représentée dans la Figure 15. Les fractions ont été significativement identiques ( $W = 1474906$ ,  $p\text{-value} = 0.2778$ ). Alors pour la suite de l'analyse, d2 a été exclus des résultats et la fraction d1 a été la seule prise en considération. Au total, 169 images (2000-2013) ont été analysées suivant le protocole du système d'imagerie afin de représenter la série temporelle de ce travail.

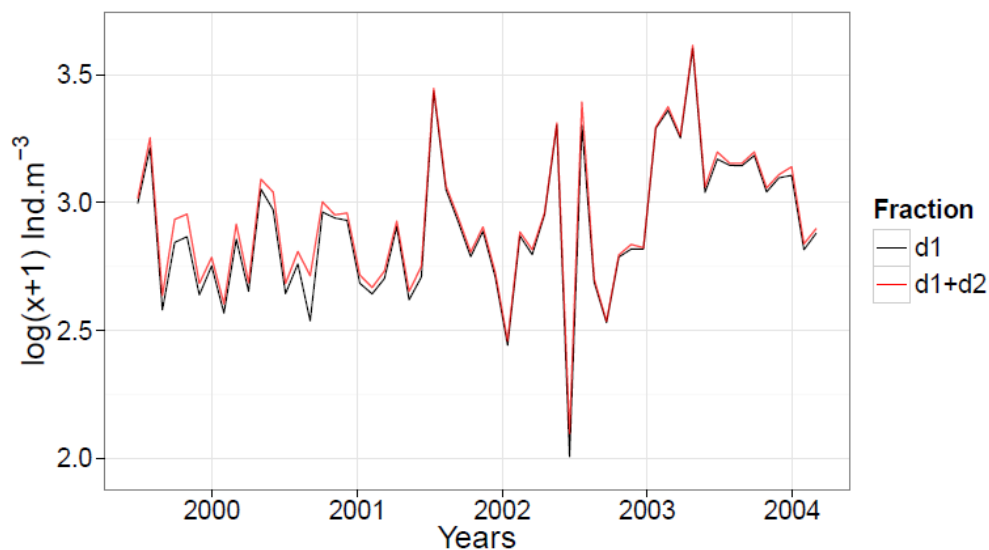


Figure 15 : Concentrations des individus zooplanctoniques dans la fraction d1 et d1+d2 des échantillons scannés au Zooscan de l'année 1999 jusqu'à 2004.

## Elimination du groupe des multiples

Le groupe des multiples ou des objets touchants (OT) correspond à ceux en contact direct l'un avec l'autre durant la phase de scanne. Ils sont liés à la qualité de l'échantillon et à la performance individuelle lors de la préparation des échantillons. Leur présence affecte le biovolume du zooplancton et modifie ainsi la forme des spectres de taille (Vandromme et al. 2012). Plus le taux des OT augmente, plus le biovolume de l'ensemble des individus augmente et surestime par la suite les valeurs réelles. Alors, il était crucial d'évaluer les erreurs en calculant le pourcentage des OT dans nos échantillons. Dans notre série, on a remarqué que 139 échantillons (84%) contiennent moins de 10% de multiples, 18 échantillons comprennent 10 à 14% de multiples, 5 échantillons de 14 à 16% et seulement 3 échantillons ont été détectés avec un pourcentage entre 16% et 24% (Figure 16). Tant que le pourcentage de ce groupe n'était pas assez élevé et n'affectait pas la fiabilité des résultats, le groupe des multiples a été éliminé de notre analyse.

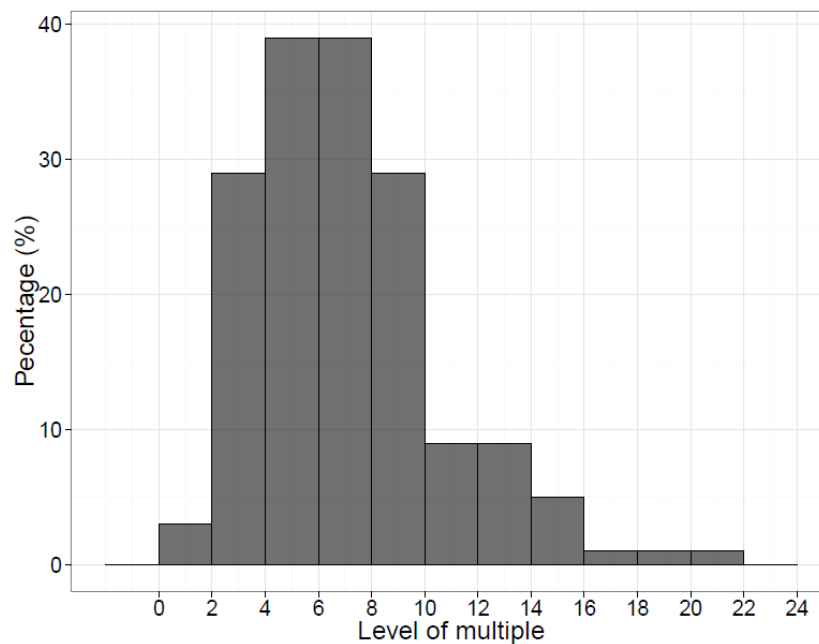


Figure 16: Histogramme représentant la fréquence du groupe des multiples dans la série temporelle au point B2.

## Traitement sur les données

### Détermination de la densité de l'eau de mer

La densité a été calculée à partir de l'équation de Millero and Poisson (1981), un standard international recommandé par l'UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization).

### Calcul de l'indice de stabilité de la colonne d'eau

Un indice de stabilité a été également estimé afin de caractériser la stabilité de la colonne d'eau. Il a été calculé comme le gradient de densité entre 0 et 60 m :

$$E = \frac{\Delta\sigma_t}{\Delta z} * 10^3$$

Où, E est exprimé en  $\text{Kg.m}^{-2}$ ,  $\Delta\sigma_t$  = la différence de densité entre les deux profondeurs 60 et 0 m et  $\Delta z$  = la différence de profondeur entre 60 et 0 m.

### Calcul des abondances du zooplancton

La concentration de zooplancton est estimée en  $\text{ind.m}^{-3}$  selon la formule suivante :

$$C = N * r / Vol * n$$

Où, N = le nombre d'organismes de plancton dénombrées dans l'image, Vol = volume d'eau échantillonné par un trait de filet, r = nombre de dilution de chaque fraction scanné, n = nombre de trait de filet (toujours égal à 1 dans cette étude).

### Calcul des biovolumes du zooplancton

Après la conversion des pixels en millimètres, on a calculé le biovolume de chaque objet imagé. Il a été estimé à partir des ellipsoïdes allongés ou "prolate ellipsoid" ( $EBv$ ) selon la formule suivante:

$$EBv = \frac{4}{3} * \pi * \left(\frac{Major}{2}\right) * \left(\frac{Minor}{2}\right)^2$$

Où, Minor = l'axe mineur de la meilleure approximation ellipsoïde de l'objet (mm), Major = l'axe majeur de la meilleure approximation ellipsoïde de l'objet (mm), EBv = biovolume ellipsoïde (mm<sup>3</sup>).

### Calcul des biomasses du zooplancton

Une fois le biovolume calculé pour chaque organisme, on a séparé les gélatineux des non gélatineux pour la conversion en masse carbonique. Les organismes gélatineux comme les siphonophores, les méduses et les thaliacés peuvent contenir jusqu'à 95% d'eau et affectent la biomasse. Pour le calcul de la biomasse de cette catégorie, on a utilisé la relation logarithmique obtenue par Molina-Ramírez et al. (2015) :

$$\log_{10} W = 2.16 + \log_{10} C$$

Où, W = masse sèche (g) calculée à partir du biovolume (1 g = 1000 mm<sup>3</sup>), C = poids en carbone (C).

Pour le groupe des non gélatineux, on a utilisé la relation logarithmique obtenue par Wiebe (1988):

$$\log CM = (\log DV + 1.434) / 0.820$$

Où, CM = poids en carbone (µg C.L<sup>-1</sup>), DV = la somme des concentrations en biovolume de chaque individu (mm<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup>).

### Construire un spectre de taille NB-SS du zooplancton

La construction du spectre de taille – biovolume normalisé (Normalized Biomass – Size Spectra, NB-SS) dans cette étude a été proposée par (Platt and Denman 1977; Platt and Denman 1978). Il consiste tout d'abord à arranger les biovolumes individuels de chaque organisme en classes de tailles selon la forme de log (xn) ; log (xn+1) avec un intervalle d'une longueur k égal à 2<sup>1/4</sup>.



La taille nominale représente le centre de chaque classe de taille et est calculée selon la formule suivante :  $\log(x_i) = (\log(x_n) + \log(x_{n+1})) / 2$ . La résultante est divisée par la largeur de la classe de taille ( $\text{mm}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-3}$ ). Les classes de tailles limites inférieures et supérieures ont été déterminées selon Nichols and Thompson (1991) et Gallienne and Robins (2001). Ils couvrent les nombres quantitatifs des organismes et au-delà de ces limites on trouve les premières classes vides. Le spectre de taille – biovolume a été normalisé en multipliant le biovolume ( $\text{mm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ) du zooplancton de chaque classe de taille par leurs tailles nominales. Finalement, les coordonnées des spectres obtenus sont représentées par  $\log(\text{mm}^3)$  pour l'axe des abscisses et  $\log(\text{m}^{-3})$  pour l'axe des ordonnées.

La pente du spectre de taille est une des variables la plus utilisée pour représenter et décrire la dynamique de taille de la communauté zooplanctonique. Elle est estimée à partir d'une régression linéaire simple sur la partie linéaire logarithmique du spectre de taille et aura la forme  $\log(Y) = a \log(X) + b$  en éliminant la première partie du spectre (avant le mode).

### **Analyse des NB-SS par groupement hiérarchique**

Cette méthode est basée sur un test de similarité ou de dissimilarité et permet de regrouper des objets similaires entre eux (Govaert and Nadi 2006). La construction du dendrogramme décrit les relations entre les  $n$  observations (les dates de collecte successives) qui sont décrites selon  $p$  descripteurs (les logarithmes naturels des biovolumes normalisés constituant le spectre NB-SS) et permet de visualiser les paramètres les plus proches. Cette méthode est basée sur le calcul de distance entre les observations deux à deux, regroupées dans une matrice. De même, plusieurs indices d'agglomération peuvent être utilisés. Pour ce travail, on a choisi la méthode avec contrainte de contiguïté avec une distance de 200 pour les spectres de taille absolus et de 2000 pour l'analyse des spectres de taille cumulés.

### **Calcul des valeurs manquantes et la régularisation des données**

Bien que la série soit plus ou moins régulière, elle comporte des données manquantes qu'on a choisi de régulariser. Dans un premier temps, toute la série (incluant les paramètres physiques, géochimiques et biologiques) a été régularisée avec le programme R Development Core Team (2010) avec un pas de temps d'un mois tout en utilisant la méthode "linéaire" pour la

prédiction et l'interpolation des valeurs. Un exemple d'une série de donnée traitée par cette méthode est représenté dans la Figure 17.

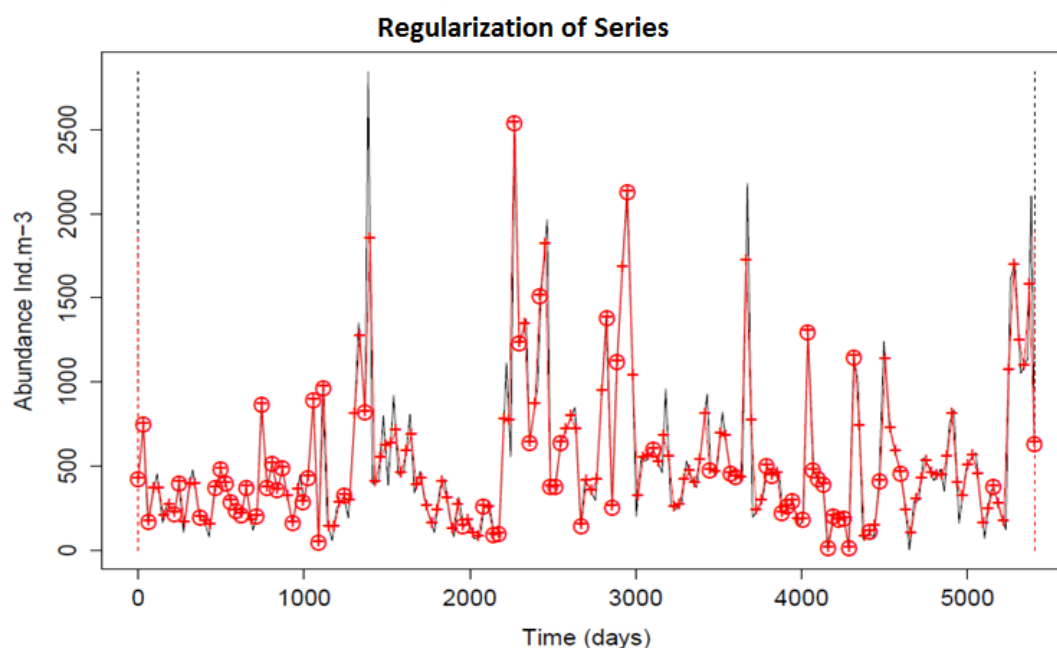


Figure 17 : Régularisation d'une série temporelle de l'abondance d'un taxon ( $\text{ind.m}^{-3}$ ). La série originale est en noir, la nouvelle série prédite est en rouge. Les croix représentent la série originale des données et les ronds correspondent aux points forts prédits

## Analyse statistique

Tableau 5: Tests statistiques effectués dans cette étude ainsi que leur application suivant chaque chapitre

Test statistique	Description	Application (Chapitre)
Test de Spearman	C'est un test statistique non paramétrique qui permet de tester la corrélation entre 2 variables (dans notre cas, ce sont les observations et le facteur temps)	Tester s'il y a une tendance générale significative dans les séries temporelles physico-chimiques et biologiques (Chapitre 4)
Test de Wilcoxon-Mann-Whitney	Egalement appelé test U de Mann-Whitney. C'est un test statistique non	Utiliser pour tester la différence entre les 2 périodes saline et non saline pour les

	paramétrique qui permet de tester la différence entre 2 groupes. Il est appliqué quand la variable ne suit pas une distribution normale et quand les variances ne sont pas identiques	paramètres physico-chimiques et biologiques (Chapitre 4 et annexe 2)
Permutational Multivariate Analysis of Variances (PERMANOVA)	Ce test sert à analyser les écarts à l'aide des matrices de distance en utilisant un test de permutation avec des rapports pseudo- <i>F</i>	Analyser l'interaction entre les taxa zooplanctoniques et les paramètres physico-chimiques afin d'étudier la succession (Chapitre 3)
Analyse Canonique des correspondances (ACC)	C'est une technique de coordination où la matrice de données transformées chi-2 est soumise à une régression linéaire pondérée sur les variables contraignantes. De plus, les valeurs ajustées sont soumises à l'analyse des correspondances effectuées via la décomposition de valeur singulière	Même choix des facteurs du PERMANOVA ; cependant, cette analyse nous donne des détails sur l'influence des variables environnementales sur la distribution des taxa (Chapitre 3)

#### - Anomalies normalisées

Les changements interannuels de chaque variable étudiée ont été représentés par des anomalies annuelles normalisées (écarts à la moyenne). Tout d'abord, une soustraction entre les valeurs annuelles moyennes de chaque variable et la moyenne de toute la série a été effectuée. Les anomalies obtenues ont été ensuite normalisées en les divisant par l'écart type de la série.

$$A_i = \frac{\bar{Y}_i - \bar{Y}}{\sigma(\sum_{i=1}^n \bar{Y})}$$

### - Somme cumulée des écarts à la moyenne

La somme cumulée des écarts à la moyenne (sans normalisation) a été utilisée afin de discriminer les principales périodes dans les changements interannuelles d'une variable (Ibanez et al. 1993). Chaque valeur de la série est soustraite de la moyenne de la série temporelle, résultant en une nouvelle série des valeurs résiduelles qui seront utilisés pour le calcul de la somme cumulative. Ensuite, chaque point est ajouté au point de données précédent. L'interprétation se base sur la pente de la droite entre segments de la série: des changements persistants de la moyenne de la série temporelle provoquent un changement persistant de la pente. Cette méthode permet la détection automatique d'un décalage dans la moyenne (non pas dans la variance) d'une série temporelle.

### - Moyenne mobile pondérée (MM)

La méthode de la moyenne mobile a été utilisée pour s'affranchir des variations mensuelles (des résidus) de chaque variable de la série temporelle. Comme son nom l'indique, cette méthode se base sur le calcul de la valeur moyenne des points contigus dans une fenêtre de  $2k + 1$  valeurs. A chaque fois, la fenêtre se déplace vers l'avant et se décale d'un point  $-k$  en aval et de  $k$  en amont. Dans notre cas, la fenêtre contient 13 points (une fenêtre d'un an) avec  $k=6$ . L'utilisation du poids ( $W$ ) à chaque déplacement de la fenêtre élimine les faibles variations et lisse la courbe résultante. Le poids au centre de la fenêtre est au maximum et diminue progressivement en s'éloignant du point central selon l'équation suivante :

$$MM_t = \sum_{T=-k}^k W_T X_{t+T}$$

## **Chapitre 3 : Cycle annuel de l'écosystème planctonique dans la zone côtière libanaise**

### **Introduction**

La phénologie est l'étude de l'évolution des rythmes naturels dans les écosystèmes. Tout changement dans la phénologie traduit directement la réponse et le fonctionnement de l'écosystème (Edwards and Richardson 2004). Ce phénomène a été attribué au changement de l'hydrologie du milieu, notamment le réchauffement des couches de surface (Hughes 2000 ; Edwards and Richardson 2004), l'augmentation de la salinité (Conversi et al. 2009) et les agressions anthropiques côtières (Isinibilir et al. 2008; Terbiyik Kurt and Polat 2013). Le recrutement et la continuité des niveaux trophiques supérieurs (comme les poissons) sont très dépendants de leur synchronisation avec la production planctoniques (Cushing 1990 ; 1995). D'où vient l'importance du plancton pour la pêche et les services écosystémiques rendues (Richardson and Schoeman 2004; Worm et al. 2006).

Les études réalisées auparavant sur le zooplancton marin des eaux libanaises ont été basées sur une série spatio-temporelle limitée tout au long de la côte libanaise (Lakkis 1982). L'échantillonnage a été effectué avec un filet WP2 de 200 microns à une fréquence saisonnière ou mensuelle dépendant de la station entre les années 1969 et 1980. L'auteur a présenté des informations importantes sur la composition et la phénologie des espèces notées dans les eaux libanaises. Pourtant, ces observations ont été suspendues depuis une dizaine d'années.

Notre étude porte sur des analyses d'une série temporelle mensuelle en un point fixe pendant la période de 2000 à 2013 avec un filet de 52 microns. Ce chapitre décrit les variations annuelles des paramètres météorologiques, physico-chimiques et biologiques, incluant les différents taxa zooplanctoniques, dans le but de :

- décrire la variabilité saisonnière de l'écosystème pélagique en se focalisant sur le zooplancton.
- identifier les forçages physiques et déterminer leur conséquence pour la succession écologique.

- identifier l'impact des apports anthropiques sur la distribution zooplanctonique.

La station choisie est située en face de la ville de Batroun (Liban Nord) où l'environnement marin est soumis aux influences de deux sources continentales (la rivière d'Al-Jaouz et l'usine chimique de Selaata). Alors dans ce chapitre, on va tester l'effet de la côte sur le point B2 (loin de ~5 km de la côte) et le classer dans l'écosystème marin libanais. La dynamique des populations planctoniques étudiée nous a permis d'élaborer une succession écologique des groupes du zooplancton et de le comparer avec le concept traditionnel de la succession planctonique.

## Résultats

Dans ce chapitre, on présente les résultats d'une moyenne de 14 années (2000-2013) concernant les évolutions annuelles des différentes variables hydrologiques et biogéochimiques entre 0 et 80 m de profondeur au point B2 à Batroun.

La ligne centrale des boîtes à moustaches (boxplots) représente la médiane de la distribution mensuelle, les moustaches (whiskers) représentent Q1 (25%) et Q3 (75%) et les points indiquent les valeurs aberrantes.

### Cycle annuel des paramètres météorologiques

En général, le climat à la côte libanaise est frais en décembre, janvier, février et mars, où la température moyenne est entre 12 °C et 15 °C (Figure 18). Le climat devient plus chaud à partir du mois d'avril et la température commence à s'élever jusqu'à ~28 °C en août arrivant parfois au maximum de ~30 °C.

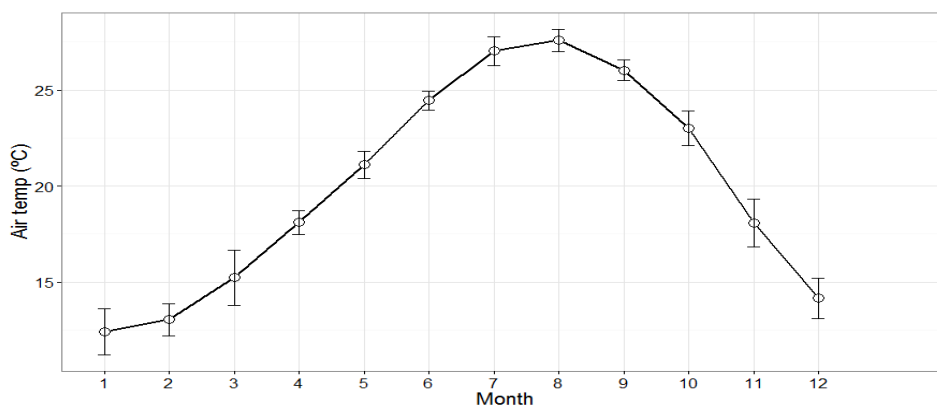


Figure 18: Cycle annuel de la Température de l'air (°C) au point B2 (2000-2012) (modifiée de Abboud-Abi Saab et al. (2013)).

Le cycle annuel de la précipitation montre que la région de Batroun est arrosée et reçoit un total de 800 à 900 mm de pluies par an (Figure 19). La période allant d'octobre jusqu'à mai est caractérisée par un temps humide avec une précipitation totale supérieures à 300 mm pour les mois de décembre et janvier. La période estivale (juin–septembre) est un temps sec et la précipitation est quasi-absente et presque nulle.

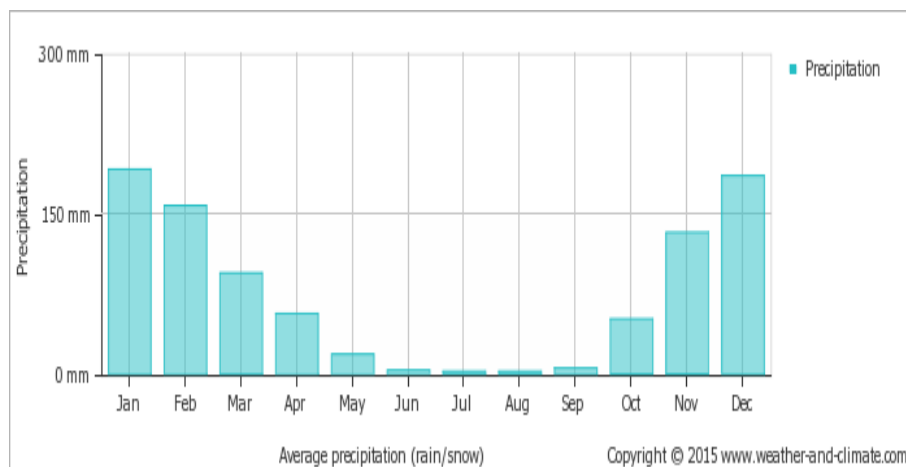
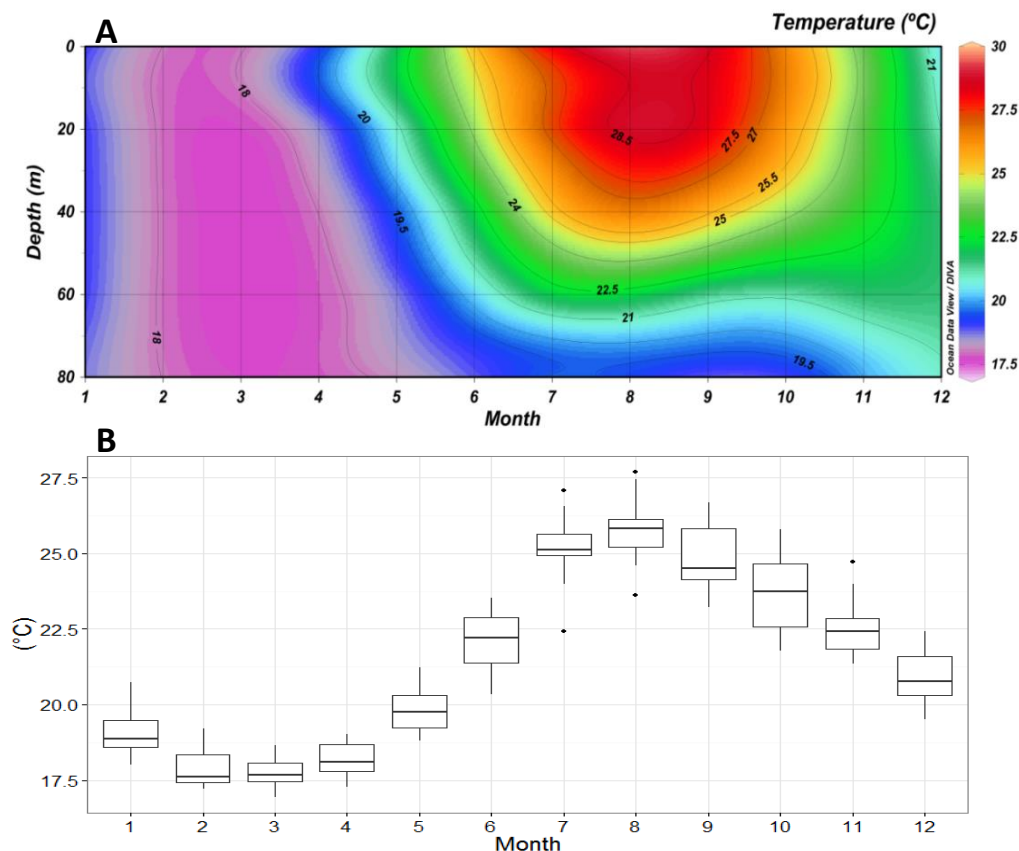


Figure 19: Cycle annuel de la précipitation (mm) à Batroun (issue de <http://www.weather-and-climate.com/>).

### Cycle annuel des paramètres physiques.

Dans les eaux libanaises, la température présente un cycle saisonnalité bien claire (Figure 20). La colonne d'eau est caractérisée par deux phases extrêmement différentes en fonction d'absence et de présence de la thermocline. La première partie s'étend de décembre jusqu'à mai avec un minimum de 18 °C en février et mars. Pendant cette période, l'eau est homogène et indique un mélange presque complet des différentes couches d'eau ; c'est l'homothermie. Un réchauffement superficiel commence à partir du mois d'avril et début de mai (20-21 °C), coïncidant l'augmentation de la température atmosphérique. La thermocline s'installe progressivement jusqu'à une profondeur de 50-60 m à partir de juillet. A ce moment, elle est bien marquée avec une couche de surface relativement chaude de 28.5 °C surmontant une couche froide à 80 m (autour de 19.5 °C). La déstratification commence en octobre–novembre, la couche de surface commence à se refroidir et l'homothermie réapparaît vers fin décembre.





**Figure 20 :** Cycle annuel de la température (°C) (A) dans la colonne d'eau et (B) de la moyenne des profondeurs au point B2 (2000-2013).

L'étude de la salinité montre aussi une stratification de la colonne d'eau (Figure 21). La salinité atteint ses valeurs minimales de 39 dans la couche de surface entre le mois de février et la fin de mai. Elle commence à augmenter progressivement à partir du mois de juin pour atteindre un maximum de 39.5 entre septembre et décembre ainsi que dans les couches plus profondes, jusqu'à 80 m, en novembre et décembre.

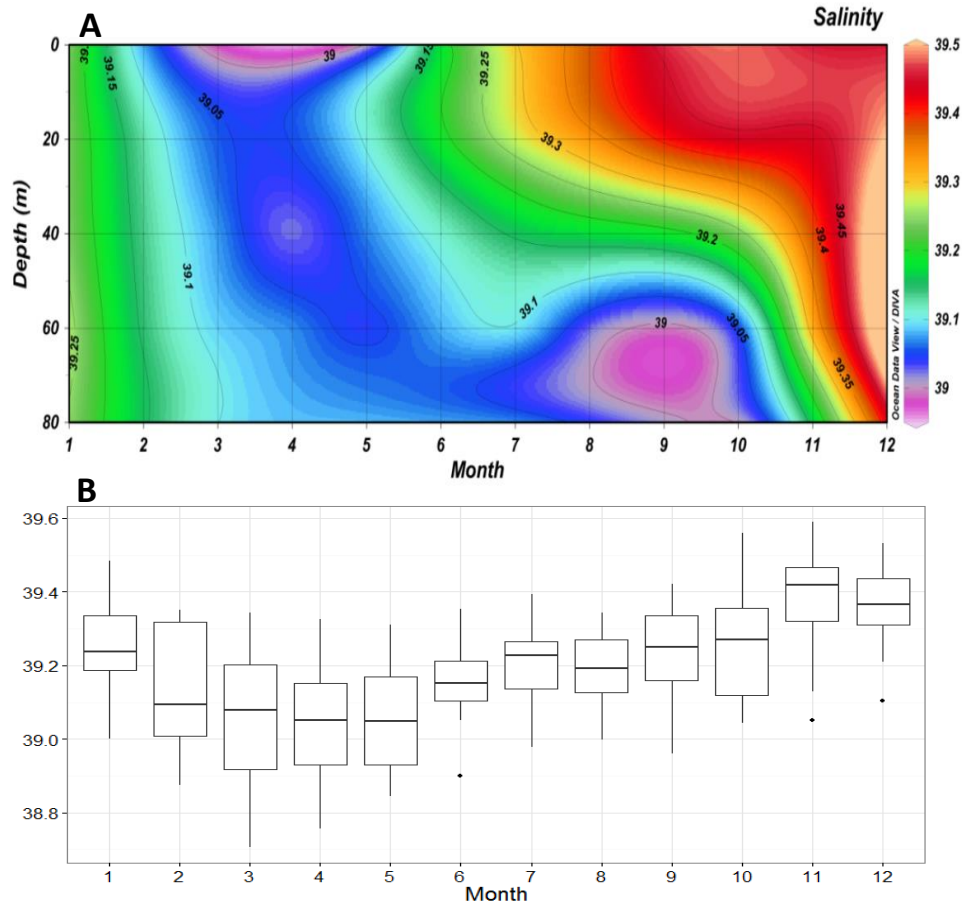


Figure 21 : Cycle annuel de la salinité (A) dans la colonne d'eau et (B) de la moyenne des profondeurs au point B2 (2000-2013).

Dans la Figure 22, la densité présente des valeurs élevées (1028–1028.5) entre décembre et avril, elle est homogène dans toute la colonne d'eau. Avec l'établissement de la stratification, la densité diminue progressivement pour atteindre un minimum de 1025 en surface en août et augmente graduellement avec la profondeur.

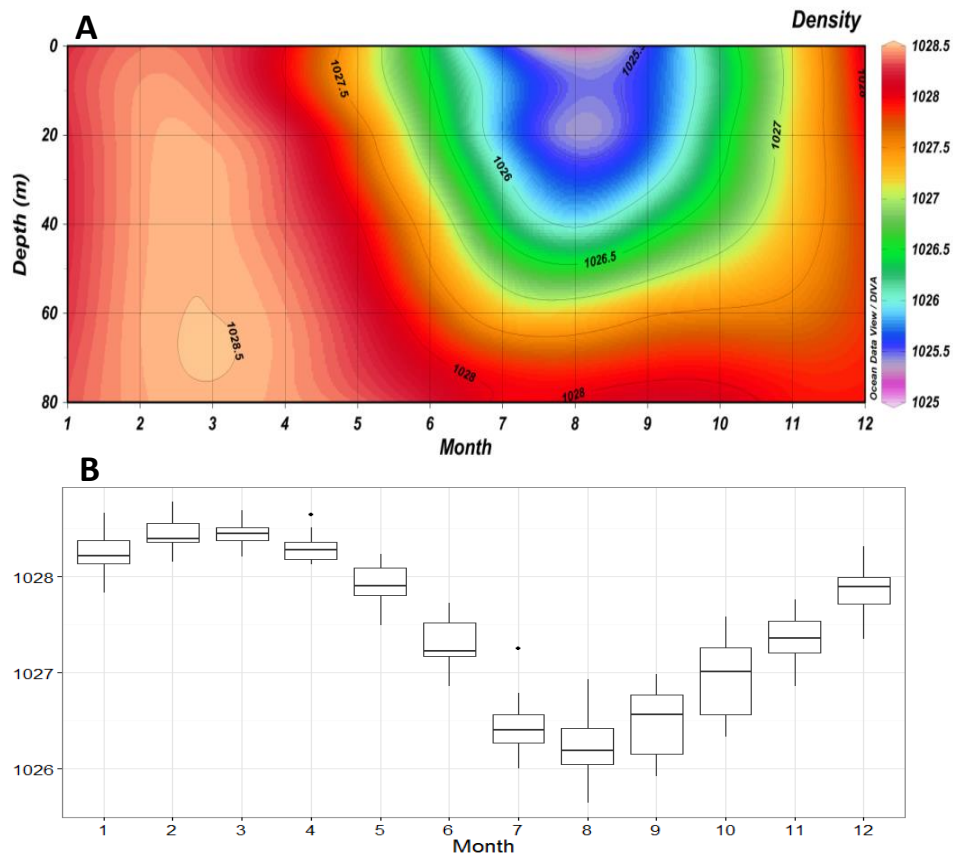


Figure 22 : Cycle annuel de la densité (A) dans la colonne d'eau et (B) de la moyenne des profondeurs représentée par une boîte à moustache au point B2 (2000-2013).

Dans la Figure 23, l'indice de stabilité présente des valeurs très minimales inférieures à 5 kg.m<sup>-2</sup> entre décembre et mars. A partir du mois d'avril, ces valeurs commencent à augmenter progressivement pour atteindre une valeur maximale de 33.4 kg.m<sup>-2</sup> en août et de 32.3 kg.m<sup>-2</sup> en septembre. Ensuite, cette stabilité chute brusquement en automne pour revenir à l'état de faibles valeurs durant l'hiver.

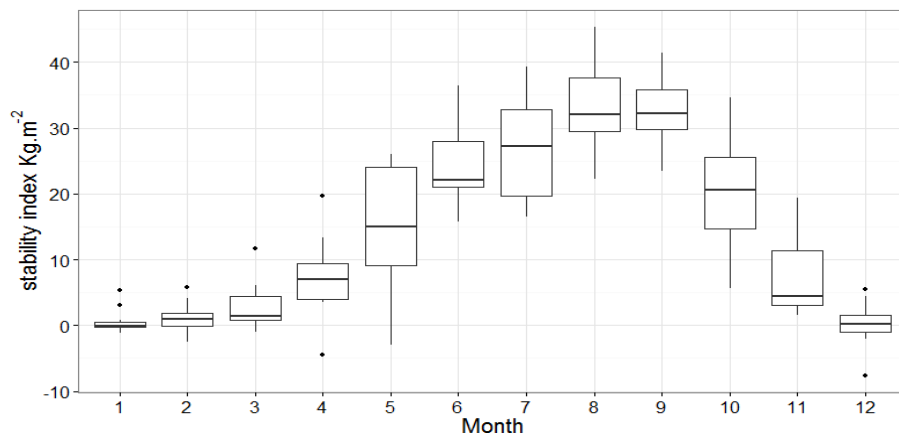


Figure 23 : Boîte à moustache représentant le cycle annuel de l'indice de stabilité en  $\text{kg.m}^{-2}$  entre la surface et 60 m au point B2 (2000-2013).

### Cycle annuel des paramètres biogéochimiques

Les concentrations en nitrates (Figure 24) sont toujours élevées dans la couche de surface (entre 0 et 20 m) avec un maximum de  $0.6 \mu\text{M.L}^{-1}$  en février et mars et de  $0.5 \mu\text{M.L}^{-1}$  en juin. Au-delà de cette profondeur, ces concentrations diminuent fortement et atteignent des valeurs inférieures à  $0.25 \mu\text{M.L}^{-1}$ . Entre décembre et mars, la colonne d'eau est homogène avec une concentration moyenne de  $0.35 \mu\text{M.L}^{-1}$ .

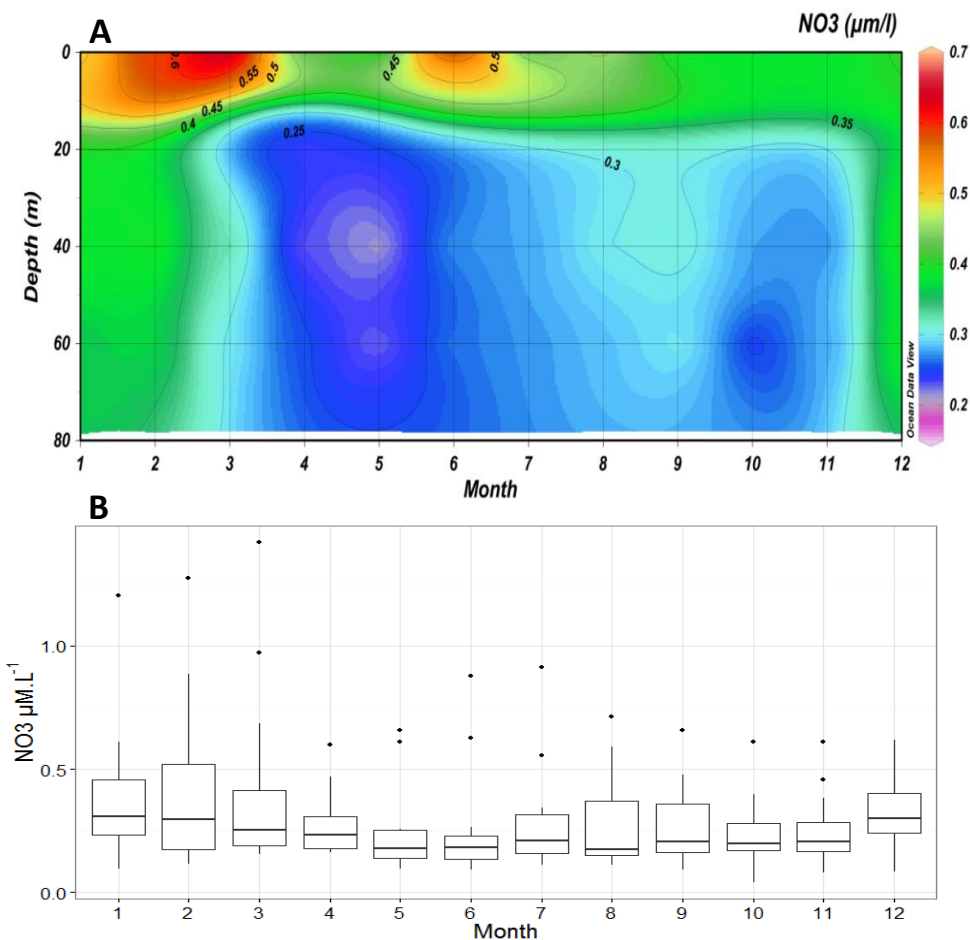


Figure 24: Cycle annuel des nitrates ( $\mu\text{M.L}^{-1}$ ) (A) dans la colonne d'eau et (B) de la moyenne des profondeurs au point B2 (2000-2013).

Les concentrations en nitrites présentées dans la Figure 25 suivent presque la même allure que celle des nitrates. La couche de surface (0-20 m) est riche en nitrites avec une valeur moyenne de  $0.06 \mu\text{M.L}^{-1}$ . Entre décembre et le début de mars, la colonne d'eau est homogène avec une augmentation des concentrations arrivant jusqu'à  $0.085 \mu\text{M.L}^{-1}$ .

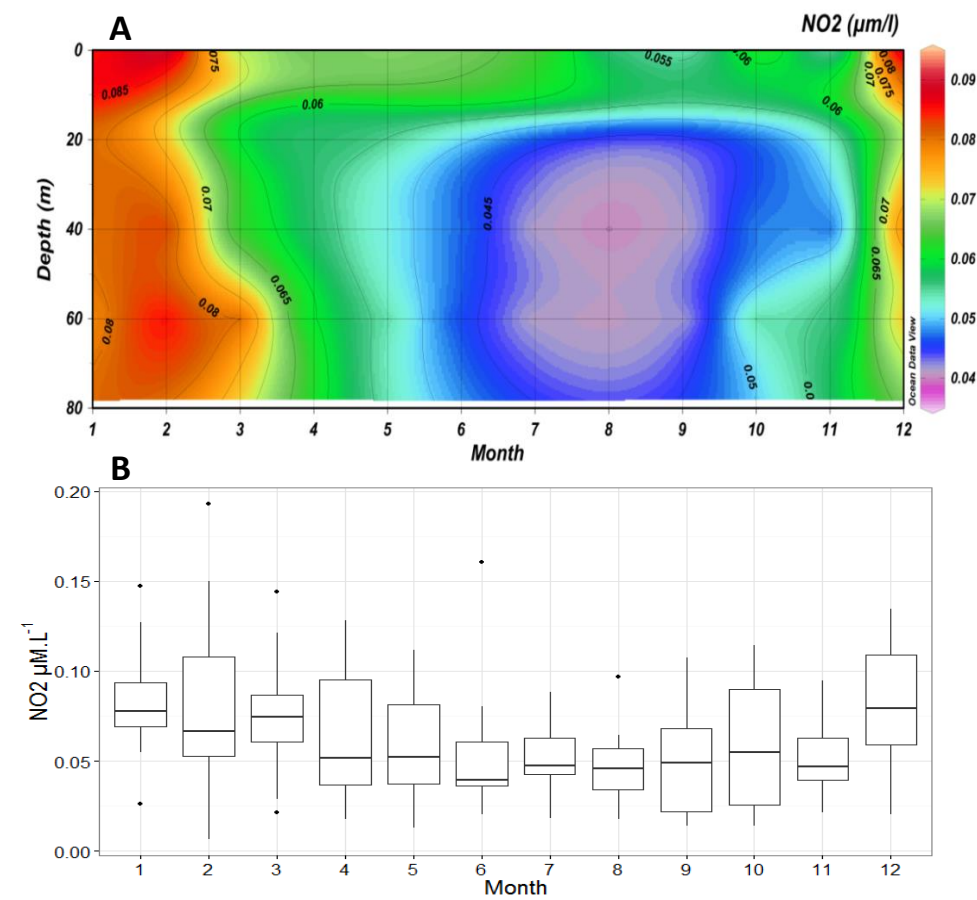


Figure 25 : Cycle annuel des nitrites ( $\mu\text{M.L}^{-1}$ ) (A) dans la colonne d'eau et (B) de la moyenne des profondeurs au point B2 (2000-2013).

Les concentrations en orthophosphate ( $\text{P-PO}_4$ ) (Figure 26) sont élevées dans la couche de surface (0-20 m) entre février et octobre avec un maximum au mois de juin ( $0.25 \mu\text{M.L}^{-1}$ ). En-dessous de cette couche, ces valeurs sont très minimales et atteignent  $0.05 \mu\text{M.L}^{-1}$  à 80 m.

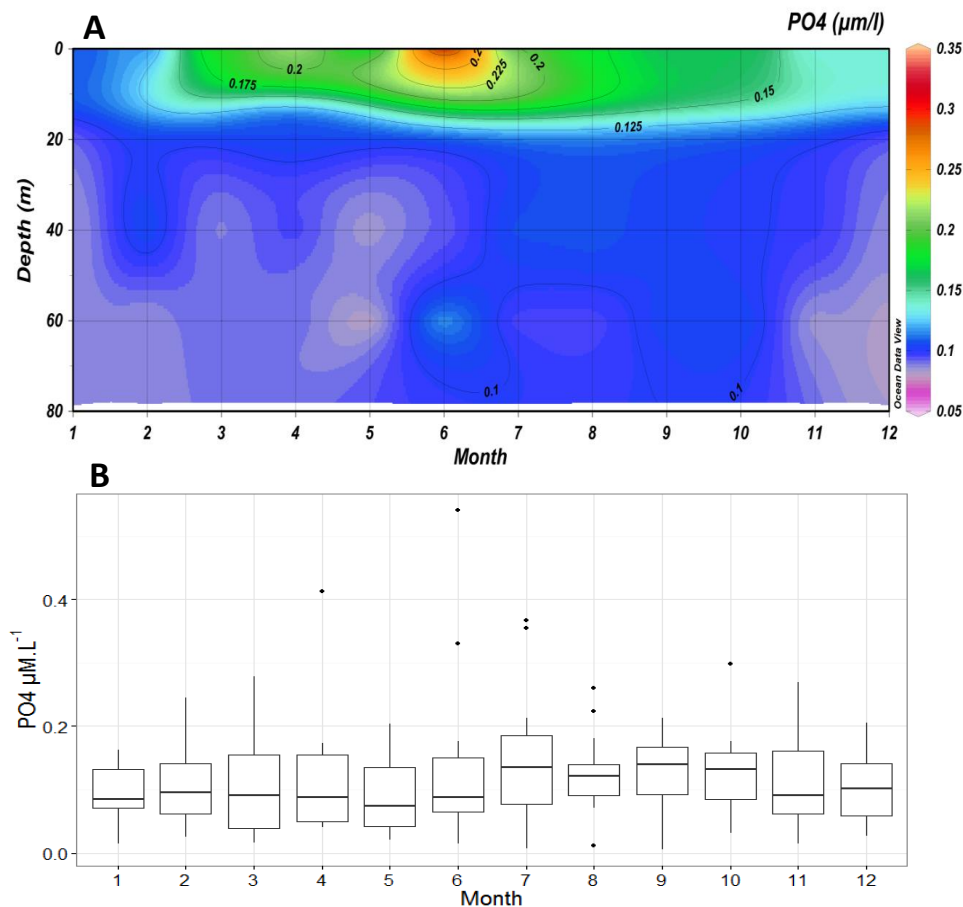


Figure 26 : Cycle annuel des orthophosphates ( $\mu\text{M.L}^{-1}$ ) (A) dans la colonne d'eau et (B) de la moyenne des profondeurs au point B2 (2000-2013).

### Cycle annuel de la biomasse de chlorophylle-*a*

La Figure 27 décrit les concentrations chlorophylliennes mensuelles au point B2 estimées à partir des images satellitaires (voir section méthode). On remarque que la chlorophylle-*a* montre un cycle saisonnier clair avec des valeurs supérieures à  $0.2 \text{ mg.m}^{-3}$  entre décembre et mars et des valeurs inférieures à  $0.1 \text{ mg.m}^{-3}$  entre avril et novembre.

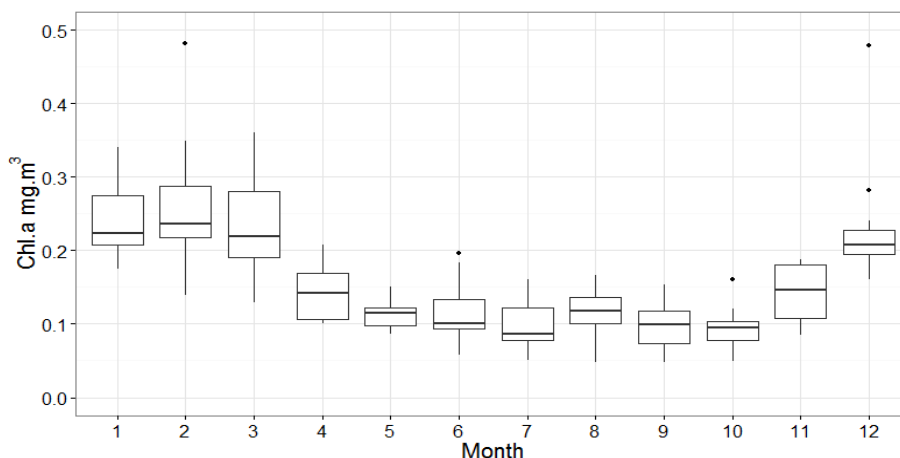


Figure 27 : Cycle annuel de la chlorophylle-*a* ( $\text{mg.m}^{-3}$ ) satellitaire à la surface d'eau au point B2 (2000-2013). Les valeurs aberrantes du mois de mars et avril ne sont pas présentées et dépassent la limite de l'axe.

## Cycle annuel de la communauté phytoplanctonique

### Phytoplancton total

La Figure 28 présente l'évolution annuelle de l'abondance du phytoplancton total représentant les populations phytoplanctoniques principales

(microphytoplancton et nanoplancton) dans la colonne d'eau au point B2 à partir de 2000 jusqu'à 2013 à l'exception de l'année 2012. Les valeurs de diatomées ont été exceptionnellement élevées en automne 2012 ainsi que les écarts à la moyenne ce qui risquent de biaiser nos résultats. Le phytoplancton présente un cycle annuel évident et bien net avec un minimum en octobre ( $123.10^3 \pm 62.6.10^3 \text{ Cellules.L}^{-1}$ ) et un maximum en avril ( $250.2.10^3 \pm 405.4.10^3 \text{ Cellules.L}^{-1}$ ) montrant que la floraison essentielle est printanière. En novembre, l'abondance phytoplanctonique augmente jusqu'à  $157.5.10^3 \pm 73.10^3 \text{ Cellules.L}^{-1}$  témoignant une deuxième poussée automnale moins comparable à la première.



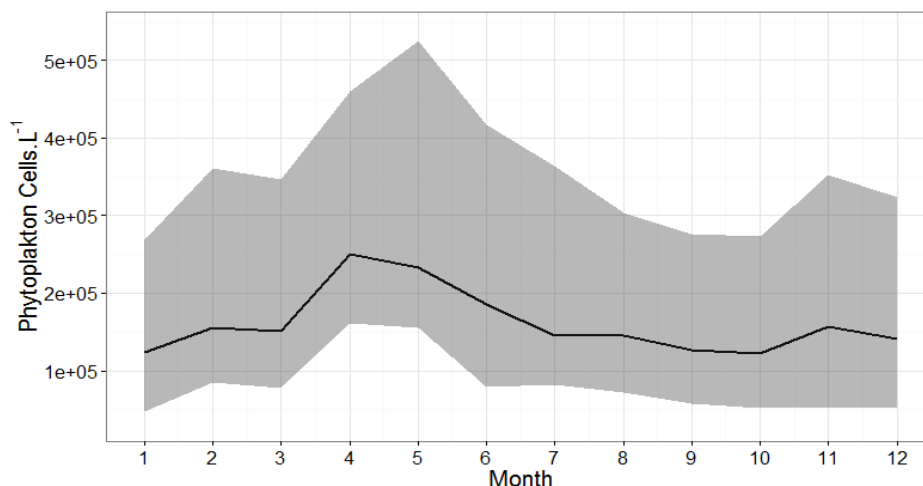


Figure 28: Cycle annuel des abondances moyennes du phytoplancton total (Cellules.L<sup>-1</sup>) au point B2 (2000-2013). La ligne centrale représente la moyenne et les zones ombrées représentent les quartiles Q1 et Q3. L'année 2012 est exclue de cette analyse

### Groupes de phytoplancton

Les populations microphytoplanctoniques sont essentiellement composées de diatomées et de dinoflagellés. L'évolution annuelle des abondances du microphytoplancton et du nanoplancton dans la colonne d'eau à B2 à partir de 2000 jusqu'au 2013 est représentée dans la Figure 29. La densité des populations nanoplanctoniques (Figure 29 A) ne montre pas un cycle clair et les abondances sont élevée durant toute l'année surtout en février, mai et novembre de  $131.5.10^3 \pm 97.5.10^3$  Cellules.L<sup>-1</sup>,  $154.9.10^3 \pm 235.10^3$  Cellules.L<sup>-1</sup> et  $128.10^3 \pm 52.10^3$  Cellules.L<sup>-1</sup> respectivement.

Les diatomées (Figure 29 B) constituent les effectifs les plus élevés du total microphytoplanctonique et leurs tracés montrent un cycle bien marqué. Ils présentent un pic printanier important de  $107.5.10^3 \pm 325.4.10^3$  Cellules.L<sup>-1</sup> en mois d'avril et un minimum de  $8.1.10^3$  Cellules.L<sup>-1</sup> au mois de janvier.

Les dinoflagellés (Figure 29 C) montrent un cycle saisonnier moins clair et les abondances commencent à augmenter à partir du mois d'avril pour atteindre un maximum de  $14.8.10^3 \pm 10.8.10^3$  Cellules.L<sup>-1</sup> au mois de mai. Les valeurs sont maintenues élevées jusqu'à la fin d'été. Cette population présente une deuxième poussée plus faible en novembre avec une abondance moyenne de  $12,3. 10^3 \pm 9.2.10^3$  Cellules.L<sup>-1</sup>.

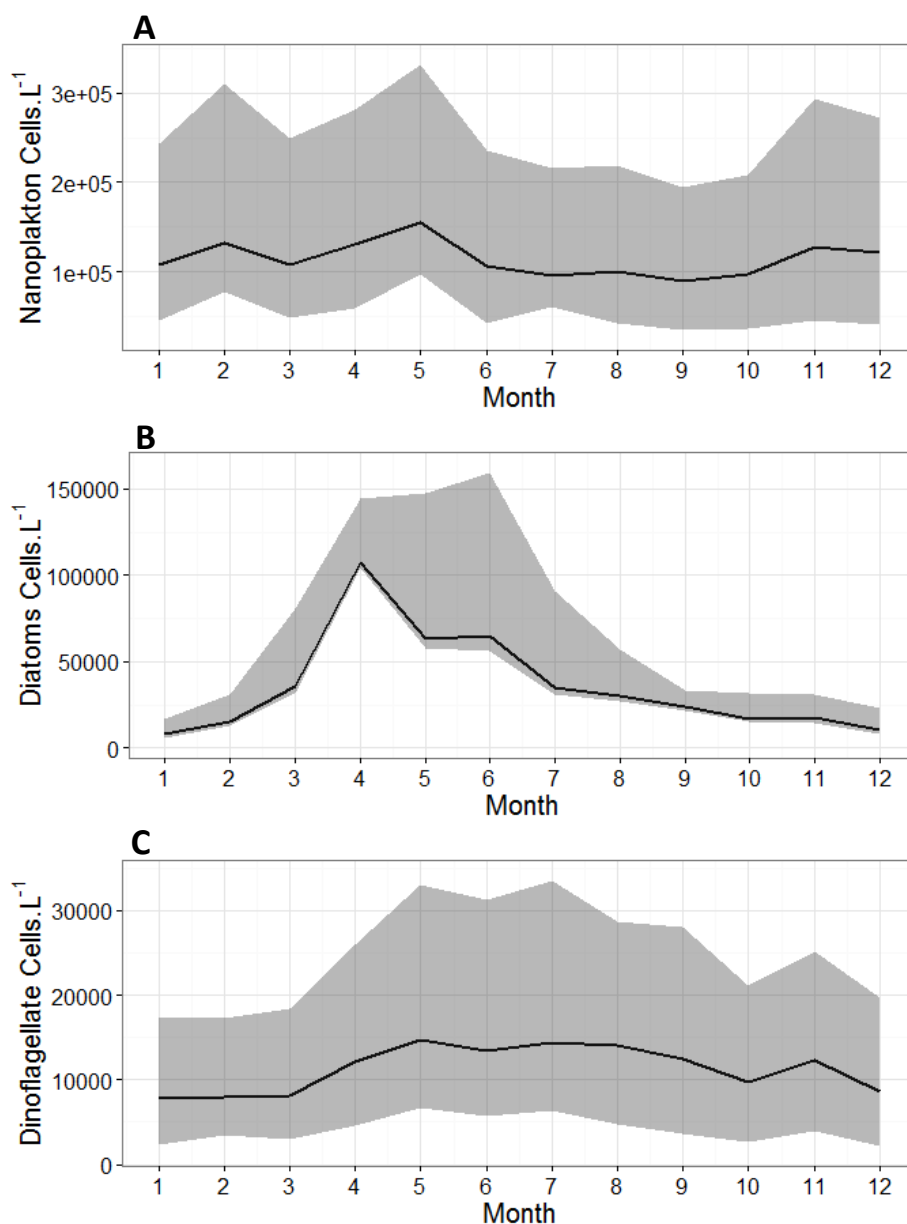


Figure 29 : Cycle annuel des abondances moyennes des principaux groupes phytoplanctoniques (Cellules.L<sup>-1</sup>) au point B2 (2000-2013). La ligne centrale représente la moyenne et les zones ombrées représentent les quartiles Q1 et Q3. L'année 2012 est exclue de cette analyse.

### Structure de la communauté zooplanctonique

On remarque que les copépodes constituent le groupe le plus important (79%) de l'abondance du zooplancton total (Figure 30 A). Les copépodes identifiés sont dominés par les groupes suivants : *Oithona* spp (17%), *Calanus* spp (4%), *Temora* spp et *Corycaeus* spp (4%) ; tandis que les autres (*Oncaea* spp, *Acartia* spp et les harpacticoïdes) présentent une abondance

inférieure ou égale à 2% (Figure 30 B). Ainsi, 65% des copépodes n'ont pas été identifiés par la méthode semi-automatique du Zooscan. Parmi les 19 autres groupes identifiés (Figure 30 C), les appendiculaires est le groupe le plus dominant (27%) suivis par les annélides (12%), les chaetognathes (11%) et les cladocères du genre *Evadne* (9%).

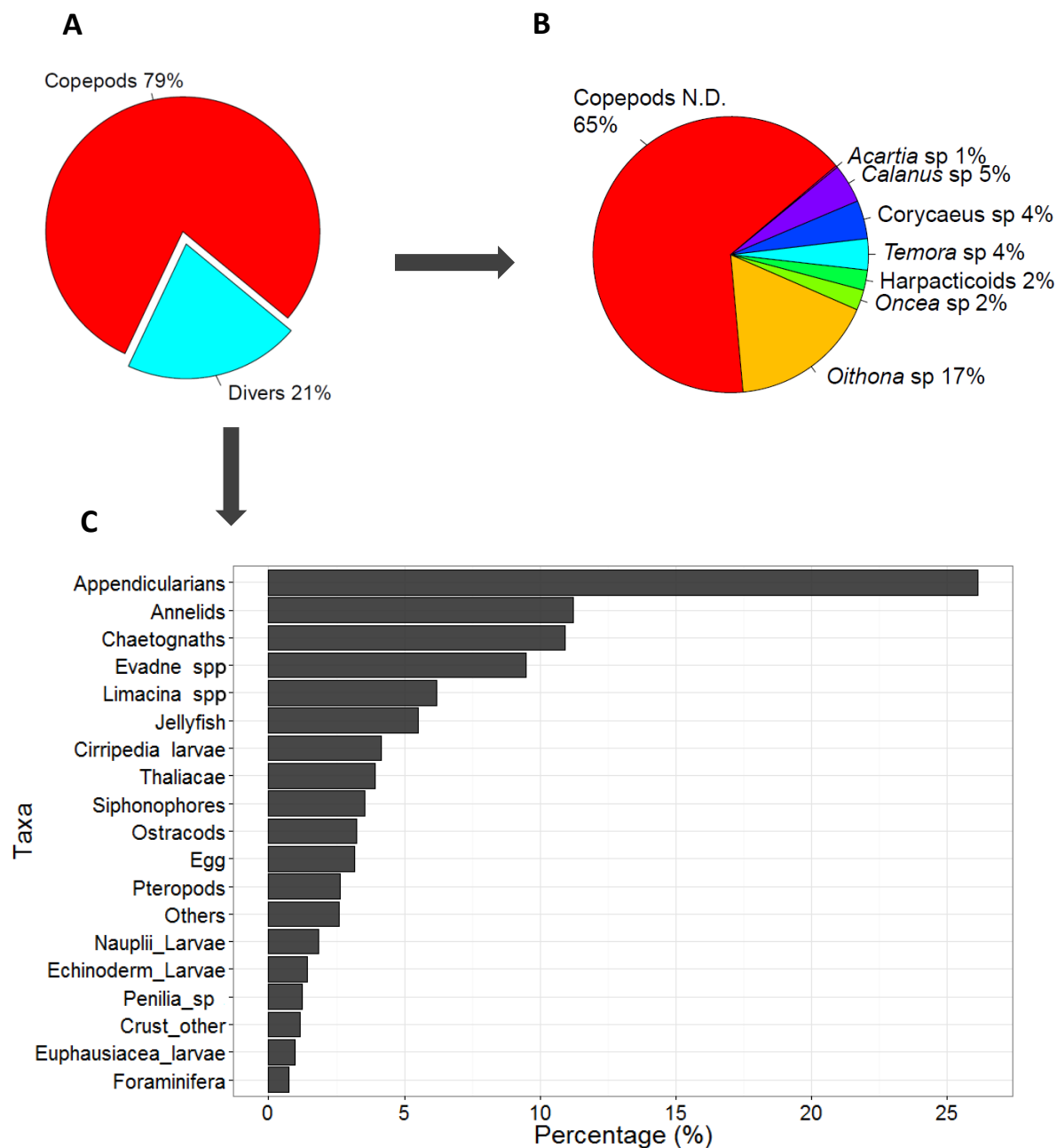


Figure 30 : Abondance relative moyenne (A) des copépodes et des autres zooplanctontes, (B) des différents groupes des copépodes et (C) des différents autres groupes zooplanctoniques identifiés au point B2 (2000-2013). Les valeurs sont exprimées en %.

L'étude des biovolumes indique que les copépodes constituent seulement 22.4% du biovolume total des échantillons, tandis que le biovolume des autres groupes représente 77.6% (Figure 31). Le biovolume des thaliacés est supérieur à 35%, celui des méduses est de 23%, des siphonophores est de 12% et les chaetognathes sont de 16%. Pour les copépodes, le biovolume du genre *Oithona* est le plus important avec 10%, suivit par celui des *Temora* spp, les *Calanus* spp et les *Corycaeus* spp de 8%, 7% et 6% respectivement ; alors que les autres taxa ont le biovolume le plus faible ( $\leq 1\%$ ).

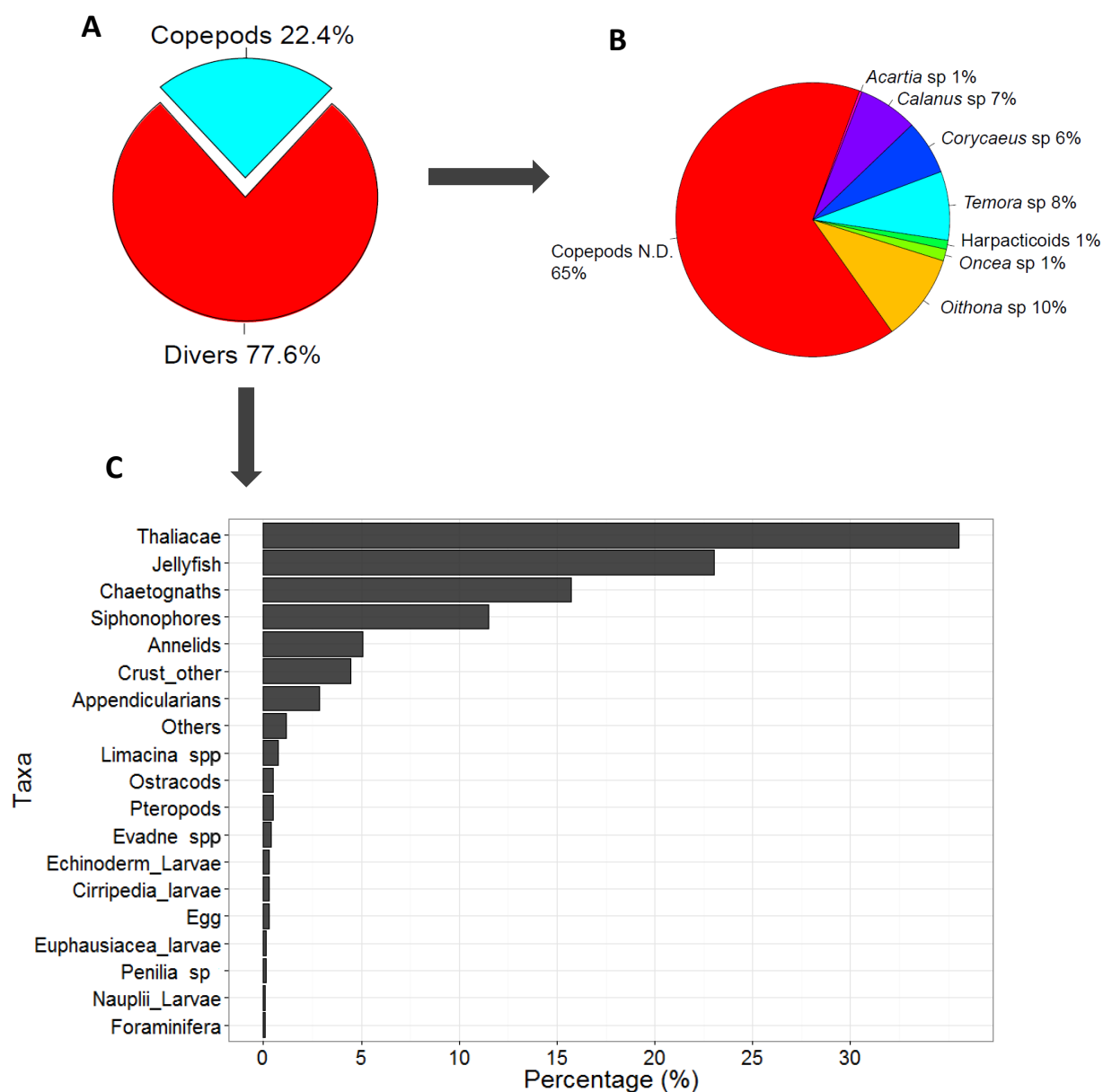


Figure 31 : Biovolume (A) des copépodes et des autres zooplanctontes, (B) des différents groupes des copépodes et (C) des différents autres groupes zooplanctoniques identifiés au point B2 (2000-2013). Les valeurs sont exprimées en %.

### Cycle annuel du zooplancton total

L'abondance de l'ensemble du zooplancton présente, un cycle annuel peu marqué avec un maximum en juillet ( $1513.4 \pm 1156.1 \text{ ind.m}^{-3}$ ) et deux minima en janvier ( $773.7 \pm 477.7 \text{ ind.m}^{-3}$ ) et en octobre ( $872.7 \pm 488.8 \text{ ind.m}^{-3}$ ) (Figure 32 A). Au contraire, le biovolume (Figure

32 B) montre un cycle saisonnier plus clair avec un maximum en mai-juin ( $174.3 \pm 206.8 \text{ mm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  et  $164.4 \pm 245.4 \text{ mm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  respectivement) et un minimum en août ( $26 \pm 17.4 \text{ mm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ).

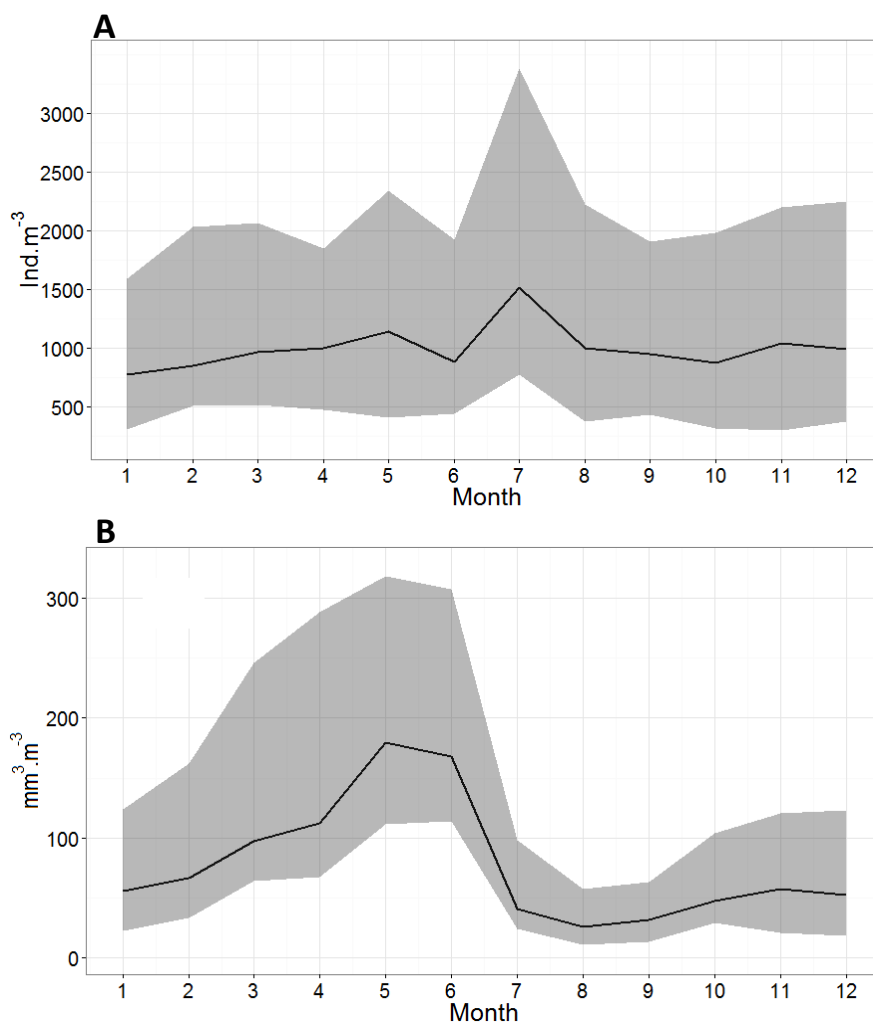


Figure 32 : Cycle annuel (A) de l'abondance et (B) du biovolume moyens du zooplankton total point B2 (2000-2013). La ligne centrale représente la moyenne et les zones ombrées représentent les quartiles Q1 et Q3.

### Dynamique des abondances des populations zooplanctoniques

La distribution saisonnière des abondances moyennes de la plupart des groupes zooplanctoniques (Figure 33) prend la forme d'une cloche dont leur développement relatif dépend des saisons. On trouve des taxa avec des abondances moyennes maximales en hiver comme les œufs divers ( $12.8 \text{ ind.m}^{-3}$  en mars), les larves nauplii ( $6.36 \text{ ind.m}^{-3}$  en mars), les larves d'euphausiacés ( $6.7 \text{ ind.m}^{-3}$  en janvier), les ostracodes, ( $12.8 \text{ ind.m}^{-3}$  en janvier), les

copépodes *Corycaeus* spp et *Oncaea* spp ( $65.5 \text{ ind.m}^{-3}$  et  $32.2 \text{ ind.m}^{-3}$  respectivement en mars et s'étend vers avril).

D'autres taxa montrent des valeurs maximales au printemps comme les ptéropodes ( $20.5 \text{ ind.m}^{-3}$  en mai), les gastéropodes du genre *Limacina* (deux pics majeurs en mai et en juillet avec une abondance moyenne aux alentours de  $35.5 \text{ ind.m}^{-3}$ ), les appendiculaires ( $109.2 \text{ ind.m}^{-3}$  en avril), les larves des échinodermes, les thaliacés, les chaetognathes, les méduses ( $8 \text{ ind.m}^{-3}$ ,  $42.2 \text{ ind.m}^{-3}$ ,  $46.5 \text{ ind.m}^{-3}$  et  $25.2 \text{ ind.m}^{-3}$  respectivement en mai) et les siphonophores (avec 2 pics majeurs de  $\sim 10 \text{ ind.m}^{-3}$  en mars et mai).

Certains groupes présentent des abondances maximales durant la période estivale comme les cladocères (*Evadne* spp et *Penilia* sp) en juillet avec une abondance moyenne de  $107.2 \text{ ind.m}^{-3}$  et  $13.1 \text{ ind.m}^{-3}$  respectivement. Les copépodes totaux montrent également une abondance maximale en juillet surtout pour les genres *Oithona*, *Temora*, *Acartia*, et les harpacticoïdes avec une abondance moyenne de  $203.2 \text{ ind.m}^{-3}$ ,  $102.5 \text{ ind.m}^{-3}$ ,  $3.9 \text{ ind.m}^{-3}$  et de  $26.9 \text{ ind.m}^{-3}$  respectivement.

En automne, on trouve les larves cirripèdes ( $35.2 \text{ ind.m}^{-3}$  en décembre) et les annélides ( $43.6 \text{ ind.m}^{-3}$  en novembre).

On trouve que certains groupes présentent de nouveau un ou deux autres poussées, que ce soit sporadiques ou régulières, moins importantes pendant d'autres saisons. C'est particulièrement les larves des échinodermes (deux pics en août et novembre), les méduses (un pic plus petit en février–mars), les siphonophores (un pic en septembre), les harpacticoïdes (deux pics en mars et mai), les *Oithona* spp (un pic en mai), les *Evadne* spp (un pic en septembre), les chaetognathes (deux pics en février–mars et juillet), les larves cirripèdes (deux pics en mars et mai), les œufs (un pic en juillet), les larves nauplii (deux pics en juillet et novembre), les larves d'euphausiacés (un pic en avril), les ostracodes (un pic en avril), les *Oncaea* spp, les thaliacés (un pic en novembre), les appendiculaires (deux pics en juillet et en octobre) et les annélides (un pic en juillet-août).

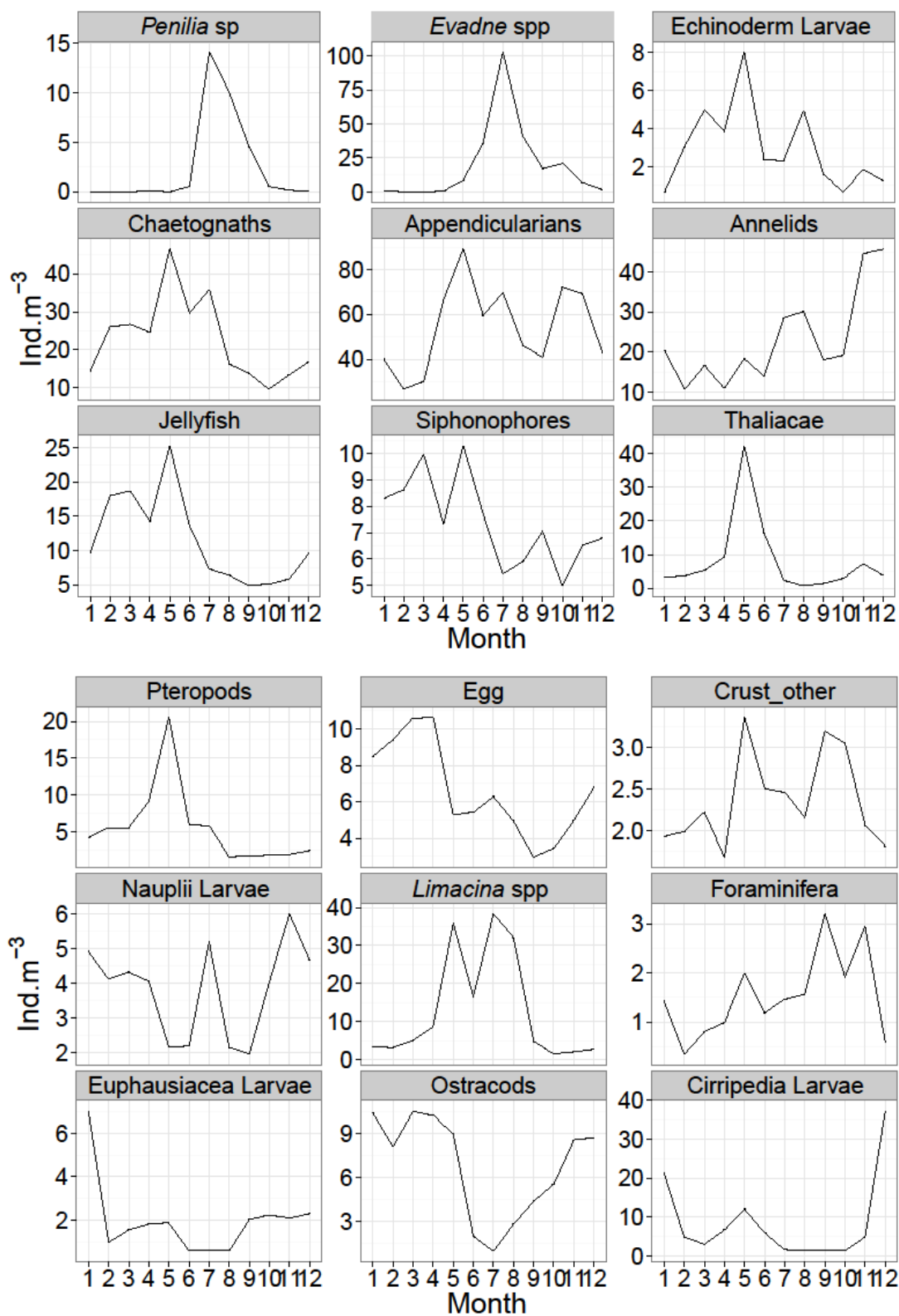


Figure 33: Cycle annuel des abondances moyennes (Ind.m<sup>-3</sup>) des différents taxa zooplanctoniques au point B2 (2000-2013).



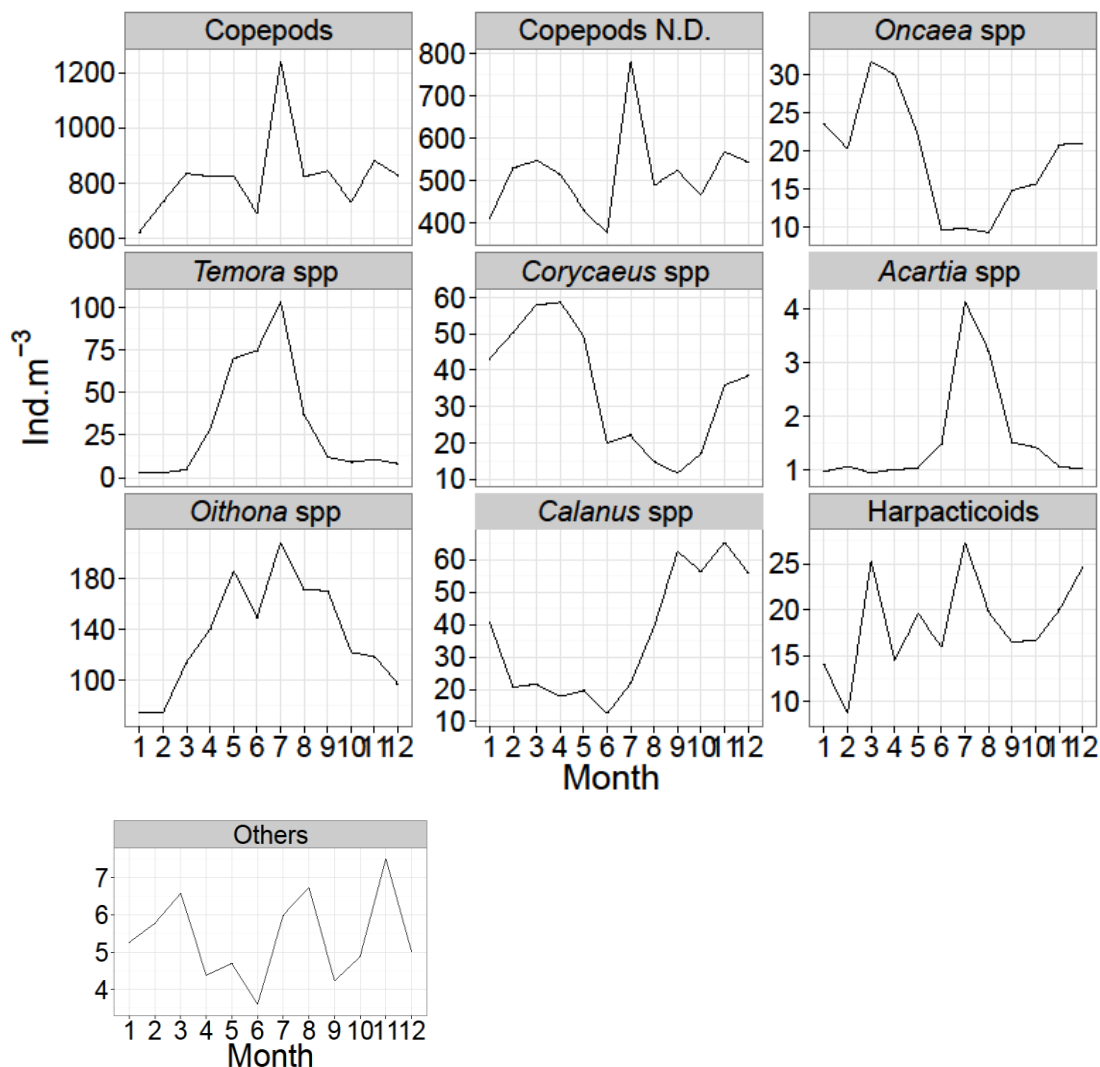


Figure 33 : Cycle annuel des abondances moyennes (Ind.m<sup>-3</sup>) des différents taxa zooplanctoniques au point B2 (2000-2013) (suite).

### Dynamique des biovolumes des populations zooplanctoniques

De même pour le biovolume, on remarque dans la Figure 34 une distribution saisonnière claire pour les différents taxa zooplanctoniques. On voit ceux qui présentent un biovolume moyen maximal en hiver, citons les siphonophores (19.01 mm<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup> en janvier), les ostracodes (1.09 mm<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup> en février), les harpacticoides (0.33 mm<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup> en mars), les œufs (0.26 mm<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup> en mars), les larves nauplii (0.08 mm<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup> en janvier) et les larves cirripèdes (0.17 mm<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup> en décembre).

D'autres montrent une valeur maximale au printemps comme les chaetognathes ( $19.93 \text{ mm}^3.\text{m}^{-3}$  en mai), les appendiculaires ( $3.33 \text{ mm}^3.\text{m}^{-3}$  en avril), les annélides ( $11.52 \text{ mm}^3.\text{m}^{-3}$  en avril), les méduses ( $51.74 \text{ mm}^3.\text{m}^{-3}$  en mai), les thaliacés ( $97.1 \text{ mm}^3.\text{m}^{-3}$  en juin), l'ensemble des copépodes ( $24.21 \text{ mm}^3.\text{m}^{-3}$  en avril) incluant les genres *Oncaea*, les *Temora*, les *Corycaeus* et les *Calanus* ( $0.39 \text{ mm}^3.\text{m}^{-3}$ ,  $4.21 \text{ mm}^3.\text{m}^{-3}$ ,  $1.72 \text{ mm}^3.\text{m}^{-3}$  et  $1.88 \text{ mm}^3.\text{m}^{-3}$  respectivement) et les larves d'euphausiacés et des échinodermes ( $0.18 \text{ mm}^3.\text{m}^{-3}$  et  $0.46 \text{ mm}^3.\text{m}^{-3}$  respectivement).

En été, on remarque les *Limacina* spp ( $1.5 \text{ mm}^3.\text{m}^{-3}$  en août), les deux genres de cladocères *Penilia* ( $0.55 \text{ mm}^3.\text{m}^{-3}$  en juillet) et *Evadne* ( $0.63 \text{ mm}^3.\text{m}^{-3}$  en août) et les copépodes du genre *Acartia* et *Oithona* ( $0.1 \text{ mm}^3.\text{m}^{-3}$  et  $2.23 \text{ mm}^3.\text{m}^{-3}$  respectivement en septembre). Tandis qu'en automne, on ne voit que les foraminifères ( $0.06 \text{ mm}^3.\text{m}^{-3}$  en novembre).

Parfois le cycle est bimodal, il y en a certains qui présentent un second pic moins faible. On cite les ostracodes, les foraminifères, les siphonophores et les genres *Limacina* et *Oithona* qui présentent un autre pic au printemps. On a les larves euphausiacés, nauplii et cirripèdes en automne, les larves des échinodermes et les œufs en été. On a de même les chaetognathes, les appendiculaires, les annélides, les méduses, les thaliacés et l'ensemble des copépodes du genre *Calanus* et *Oncaea* et les harpacticoïdes en automne.

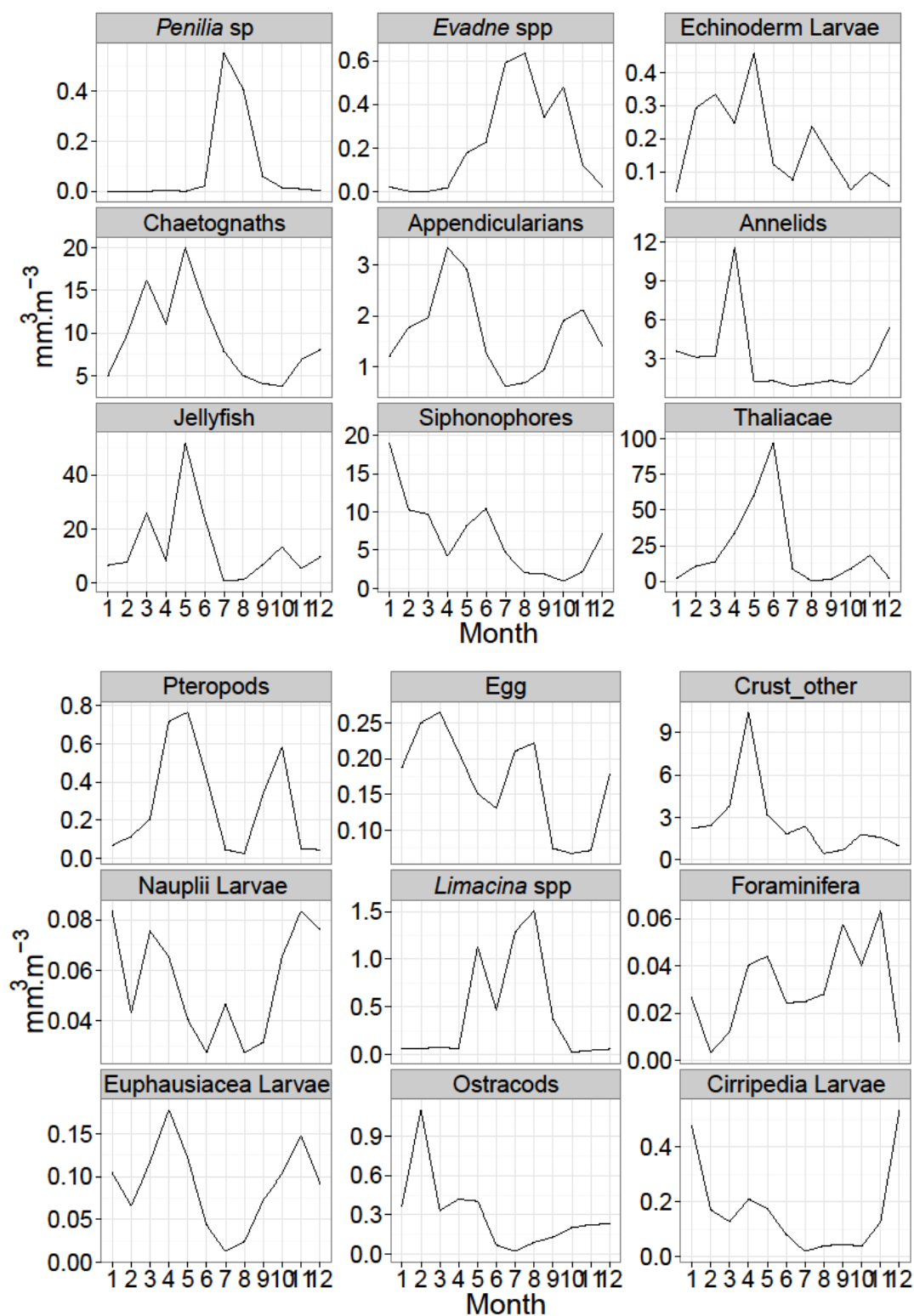


Figure 34 : Cycle annuel des biovolumes moyens ( $\text{mm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ) des différents taxa zooplanctoniques au point B2 (2000-2013).

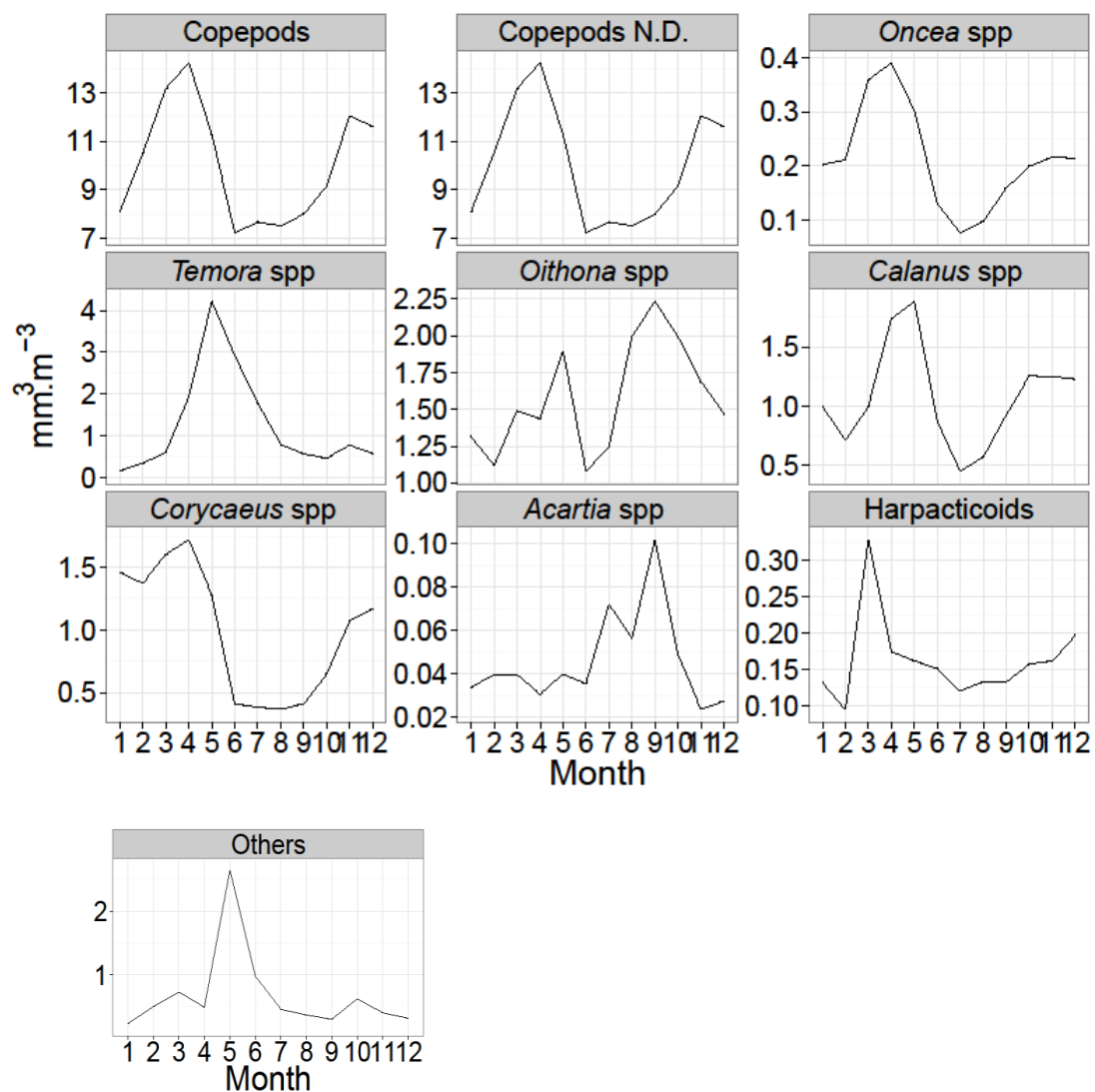


Figure 34 : Cycle annuel des biovolumes moyens ( $\text{mm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ) des différents taxa zooplanctoniques au point B2 (2000-2013) (suite).

## Discussion

### **Forçage des variables climatiques sur l'hydrologie**

Le but de cette partie est de démontrer l'effet direct de la climatologie sur l'hydrologie dans la région d'étude. Dans les eaux libanaises, la thermocline estivale est de longue durée et permanente (de six mois) et arrive jusqu'à 50-60 m (Abboud-Abi Saab et al. 2004). En été, par le réchauffement de la couche de surface et l'augmentation de la stabilité, une stratification a commencé à s'établir dans la colonne d'eau avec des températures élevées en surface et basses en profondeur (Figure 23). Le refroidissement progressif de la couche de surface débute en automne suite à la diminution de la température atmosphérique (Figure 18) et à l'action du vent. Ceci induit un brassage des eaux, la chute rapide de la stabilité est traduite par la quasi-homogénéité de la densité dans la colonne d'eau.

La variation saisonnière de la salinité a été également bien marquée au point B2 et les valeurs minimales de la couche de surface ont été observées entre février et mai (Figure 21). La salinité en surface est essentiellement modulée à l'interface air-mer et sujette à de grandes variations auprès de la côte, en plus des flux d'eau douce qui contrôlent le bilan de sel. Les valeurs minimales détectées ont été logiquement influencées par la proximité des fleuves. Ces derniers ont été liés principalement aux précipitations qui peuvent atteindre les 1000 mm d'eau au Nord du Liban (Makké-Traboulsi 2010) et également à la fonte des neiges. Par contre, les valeurs maximales ont été plutôt dues à l'évaporation intense à partir de juin et aux précipitations relativement faibles.

### **Sources continentales des nutriments**

Les caractéristiques géomorphologiques de la station B2 indiquent qu'elle s'insère dans l'ensemble des eaux de large. Or dans cette section, on va démontrer qu'elle est sujette à une pression anthropique à travers la rivière d'Al-Jaouz et du complexe d'engrais chimique existant dans la région. Les sels nutritifs ont été concentrés dans la couche de surface et se sont raréfiés à 20 m et aux autres niveaux plus profonds (Figure 24 et 22). Cet aspect particulier a été expliqué

par un enrichissement continu par des traces d'eaux douces riches en sels nutritifs et dont l'importance dépend de la vitesse et de la direction du vent (Abboud-Abi Saab et al. 2010).

Les valeurs des sels nutritifs ont présenté au point B2 des valeurs anormales relativement à la condition normale dans le milieu (Nitrate  $>0.4 \mu\text{M.L}^{-1}$ , phosphate  $>0.15 \mu\text{M.L}^{-1}$ , Figure 24 et Figure 26). En général, ce sont les décharges mensuelles des fleuves qui enrichissent les eaux libanaises en sels nutritifs (Khalaf 1997). Dans la région de Batroun, la rivière d'Al-Jaouz a été considérée comme une source majeure riche en ces éléments, plutôt en nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) et nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ) qu'en orthophosphate ( $\text{P-PO}_4^-$ ) (Abboud-Abi Saab et al. 1999-2002). Ceci a été évident en hiver et au printemps, dans les périodes où cette rivière saisonnière a été en pleine activité. Abboud-Abi Saab et al. (1999-2002) et Fakhri et al. (2005) ont déjà signalé des valeurs élevées en nitrates ( $25.36 \mu\text{mol.L}^{-1}$ ) et faibles quantités en orthophosphates durant les périodes de crues (allant de  $0.001 \mu\text{mol.L}^{-1}$  à  $1.3 \mu\text{mol.L}^{-1}$ ). La présence de  $\text{P-PO}_4^-$  dans les eaux naturelles a été actuellement liée à la nature chimique des terrains avoisinants qui sont lessivés par les eaux de pluies.

Dans le cas des phosphates, la situation est un peu différente. La permanence des rejets d'orthophosphates par l'usine de Selaata dans les eaux marines de Batroun a laissé son empreinte à la station B2 éloignée géographiquement de la côte. Ceci a été évident dans les valeurs obtenues dans la couche de surface (Figure 26). Fakhri et al. (2005 ; 2011) ont également trouvé un enrichissement dans la région qui est de cinq à dix fois plus élevées que celles signalées dans les eaux côtières du levant (Krom et al. 1991 ; 2004 ; 2014 ; Tselepidis et al. 2000). Alors, la source principale d'enrichissement de la région en orthophosphates provient sans doute de l'usine. Parfois, ces éléments anthropiques peuvent arriver à la station B2, même plus loin, quand le panache est dévié vers le Sud sous l'action du vent de Nord (Abboud-Abi Saab et al. 2010). La morphologie de la côte, presque rectiligne et ouverte aux vents et aux mouvements des vagues, a contribué à la dispersion de ces rejets au large.

On peut donc penser que les produits à base d'azote (correspondant à la rivière d'Al-Jaouz et les déversements phosphatés du complexe chimique) ont masqué les valeurs naturelles dans la colonne d'eau au point B2 situé à plusieurs kilomètres au large.

## **Impact des forçages environnementaux sur la dynamique du plancton**

Le bassin Levantin oligotrophe est caractérisé par une eau généralement pauvre en éléments nutritifs et par une faible biomasse phytoplanctonique (Psarra et al. 2000 ; Christaki et al. 2001 ; Siokou-Frangou et al. 2010). La richesse moyenne du phytoplancton dans cette région est parmi les plus basses de la Méditerranée (Abboud-Abi Saab 1985). A l'échelle annuelle, leur dynamique a été fortement liée aux conditions météorologiques et hydrologiques que ce soit dans les eaux libanaises (Abboud-Abi Saab et al. 2008 ; 2010) ou dans d'autres parties de la Méditerranée (Aubry et al. 2012 ; Romero et al. 2014). On a remarqué dans notre étude que la poussée printanière a été constituée principalement de diatomées en avril puis des dinoflagellés et du nanoplancton (Figure 29). Ceci a confirmé la succession des populations présentée par les travaux précédents dans la région (Abboud-Abi Saab et al. 2010). Brièvement, l'enclenchement d'une efflorescence printanière a eu lieu lorsque les conditions environnementales ont été favorables (début de l'homothermie et présence des concentrations élevées en nitrates et nitrites dans la colonne d'eau). Durant la période estivale et automnale, l'installation de la thermocline, l'augmentation de la stabilité et l'abaissement des concentrations en sels nutritifs dans la colonne d'eau ont abouti à la diminution des abondances des diatomées qui ont été remplacés par les dinoflagellés et les nanoplanctons. Ces floraisons ont été observées également par Ribera d'Alcalà et al. (2004) au Golfe de Naples et par Bustillos-Guzman et al. (1995) au point B à Villefranche-sur-mer. Les auteurs ont détecté la même périodicité (timing) des poussées phytoplanctoniques en avril-mai.

La dynamique du zooplancton a été influencée par celle du phytoplancton (Beaugrand and Reid 2003). Nos résultats ont montré que le développement du zooplancton est très couplé avec celui du phytoplancton de point de vue biomasse. En été, la biomasse du zooplancton total a diminué tandis que le nombre a augmenté (Figure 28 et Figure 32). On peut émettre une hypothèse sur la présence de grands adultes zooplanctoniques au cours du bloom phytoplanctonique printanier en phase de la reproduction. L'augmentation du nombre de zooplancton de petite taille (en particulier les larves nauplii) laissent penser que le début de l'été correspond à la période de recrutement (Figure 32). Donc, on suggère que les fortes productions phytoplanctoniques ont permis au maintien des gros individus qui vont éventuellement se reproduire à la fin du printemps. Une autre hypothèse pourrait être émise sur le remplacement

des grandes espèces par des espèces plus petites. Le détail taxonomique obtenu par le Zooscan ne nous a pas permis de vérifier un tel changement de communauté. Il est à noter qu'une forte abondance estivale a déjà été observée par Lakkis (1982) dans les eaux libanaises, par Terbiyik Kurt and Polat (2013) dans la baie d'Iskenderun en Turquie, par Fernandez de Puelles et al. (2003) dans la mer Baléare et par Romagnan et al. (submitted) à Villefranche-sur-mer.

### **Analyse comparative du zooplancton avec les travaux précédents**

Plus de quinze ans après les dernières études faites dans les eaux libanaises (Lakkis 1982 ; 1984 ; 1990a ; 1990b), il est crucial d'évaluer la situation actuelle du zooplancton et de savoir s'il suit toujours la même évolution. De point de vue numérique, Lakkis (1982) a trouvé que le zooplancton a été constitué de 65% de copépodes, 21% de larves planctoniques, 10% de cladocères, 4% d'appendiculaires et de thaliacés, 3% de chaetognathes, 1.5% de siphonophores et de méduses et 2.5% formés d'autres organismes. Ces proportions diffèrent des résultats trouvés au point B2 (Figure 30). Il faut prendre en considération tout d'abord, i) l'efficacité du filet utilisé dans cette étude de vide de maille 52  $\mu\text{m}$ , qui est inférieur à celui utilisé dans les travaux précédents (WP2 200  $\mu\text{m}$ ) afin de retenir les organismes de petites tailles (Calbet et al. 2001 ; Di Mauro et al. 2009 ; Miloslavic et al. 2014) et ii) la méthodologie de travail suivie dans les deux cas.

De point de vue composition, on a eu des similarités avec les travaux préexistants en tenant compte du timing du maxima et du minima de certains groupes comme les ostracodes et les chaetognathes, ainsi que des dissimilarités dans d'autres, on cite : les ptéropodes (en été et automne), les siphonophores (entre décembre et mars), les *Limacina* spp (entre mars et avril), les larves cirripèdes (en janvier et février et parfois en mai), les thaliacés (en mars et juin) et les larves euphausiacés (en octobre).

L'étude quantitative et qualitative de la composition du zooplancton a montré que les copépodes constituent le composant majeur au point B2 avec une abondance de ~80% de l'ensemble du zooplancton. Cette dominance a déjà été signalée par Mazzocchi et al. (1997) dans la Méditerranée orientale et par Nowaczyk et al. (2011) dans le bassin Levantin avec une



abondance supérieure à 90%. Des résultats similaires ont été reportés dans d'autres pays méditerranéens (Tableau 6).

Tableau 6 : Pourcentage des copépodes trouvés dans différentes régions de la Méditerranée

Régions	Type de filet et vide de maille (µm)	Pourcentages des copépodes	Références
Lattaquié, Syrie	WP2 200	65 et 97%	Baker et al. (1994a)
Golfe de Gabès	Bongo 100	78%	Drira (2009)
Lagune Nord de la Tunisie	-	70%	Annabi-Trabelsi et al. (2005)
Bassin Algérien	WP2 200	72%	Riandey (2005)
Mer Alborane	WP2 200	66 et 71%	Gaudy and Youssara (2003)
Nord-Ouest du Levantin et Sud-Est de la Mer Egée	WP2 200	60 et 90%	Pancucci-papadopoulou et al. (1992)
Baie de Blanes, Nord-Ouest de la Méditerranée	WP2 200 et 45	91%	Calbet et al. (2001)
Majorque, mer de Baléare	Bongo-20 250	51-56%	Fernández de Puellas et al. (2003 ; 2007)
Golfe de Tunisie	Nansen 220	>70%	Ben Lamine (2015)
Golfe de Naples	Nansen 200	70 à 80%	Mazzocchi and Ribera d'Alcala (1995)
Toulon, France	90	80%	Jamet et al. (2001)
Canal de Neretva, mer Adriatique	Nansen 125	> 60%	Vidjak et al. (2007)

Pendant la période d'échantillonnage, six genres de copépodes appartenant aux ordres des cyclopoïdes, calanoïdes, poecilostomatoïdes et harpacticoïdes ont été observés au point B2. Ces différents ordres ont été également décrits dans les eaux libanaises avec une dominance des calanoïdes (Lakkis 1990a) et dans d'autres régions de la Méditerranée (Annabi-Trabelsi et al. 2005). Dans la présente étude, l'ordre des cyclopoïdes était dominant dû à l'abondance du genre *Oithona* connu pour sa capacité d'adaptation physiologique à des conditions environnementales

changeantes et diverses (Riccardi and Mariotto 2000). Cette prédominance a été également remarquée dans le Golfe de Gabès (Drira 2009), le bassin Algérien (Riandey 2005), le Golfe de Sironikos (Christou 1998) et le Golfe de Naples (Mazzocchi and Ribiera D'alcalà 1995).

On a trouvé également une prédominance des appendiculaires de 25% sur la communauté zooplanctonique au point B2. D'après Calbet et al. (2001) ; Di Mauro et al. (2009) et Miloslavica et al. (2014), les appendiculaires de petites tailles appartenant au genre *Oikopleura* sont mieux retenus par un filet de 52 µm de vide de maille. Or, ce groupe n'a pas montré un cycle saisonnier clair. Ces organismes ont été présents en grand nombre durant toute l'année avec une abondance maximale au printemps (avril) ; alors que Lakkis (1982) a décrit un cycle saisonnier clair marqué par une abondance maximale printanière (en mai) et un pic moins accentué en novembre suite à la poussée phytoplanctonique automnale.

De même pour les cladocères, une prédominance a été observée dans cette étude avec un pic maximal en juillet-août. Lakkis (1982) avait signalé une première apparition en avril-mai et une deuxième apparition plus ou moins importante entre juin et août. Une corrélation significative a été notée entre l'abondance des cladocères et la température (Calbet et al. 2001 ; Johns et al. 2005 ; Piontkovski et al. 2012). La prédominance de ce groupe a été également observée par Calbet et al. (2001) dans la partie Nord-Est de la Méditerranée, par Fernandez de Puellas et al. (2007) dans la mer Baléare à la fin du printemps et au début de l'été et par Zenginer-Yilmaz and Besiktepe (2010) dans la baie de Mersin durant les saisons chaudes. Cinq espèces appartenant seulement aux genres *Evadne* et *Podon* ont été notées dans la partie Est de la Méditerranée (Lakkis 1982). Or dans cette étude, une présence particulière du genre *Penilia* a été détecté au point B2.

La prédominance des deux groupes des appendiculaires et des cladocères a été également signalée dans le Golfe de Naples (Mazzocchi and Ribiera D'alcalà 1995), dans le Golfe de Saronikos (Siokou-Frangou 1996), dans le Golfe de Blanes (Calbet et al. 2001), dans la baie de Mersin (Zenginer-Yilmaz and Besiktepe 2010) et d'Iskenderun (Terbiyik Kurt and Polat 2013) en des proportions et des distributions différentes.

## Impact des forçages environnementaux sur la dynamique du zooplancton

Les facteurs hydrologiques conditionnent le cycle écologique des groupes zooplanctoniques (Fernandez de Puellas and Molinero 2008). L'interaction entre deux ou plusieurs paramètres physico-chimiques joue également un rôle significatif dans cette distribution. Dans notre analyse, le facteur température a été le plus corrélé à la distribution de l'abondance du zooplancton (Tableau 7) en plus que la salinité, la densité et les nitrates. En hiver, les faibles valeurs de température et de salinité et le mélange dans la colonne favorise le développement phytoplanctonique dominé par les diatomées. Par conséquent, la biomasse du zooplancton a augmenté en favorisant la reproduction à la fin du printemps. En été, la température et la salinité plus élevées et la stratification de la colonne ont été favorables pour un recrutement probable des crustacés planctoniques juvéniles.

Tableau 7 : Résultats du test de Permanova réalisé sur toute la série zooplanctonique et hydrobiologique au point B2.

Interaction entre les paramètres	Valeur F	p-value
Température	9.9437	0.001 ***
Salinité	2.8948	0.003 **
Densité	1.8273	0.042 *
NO3	2.1927	0.028 *
Température : Stratification	2.7303	0.017 *
Température : Densité	3.0798	0.004 **
Température : Salinité: Stratification	1.9072	0.039 *
Densité: PO4 : NO2	1.9716	0.046 *
Stratification : NO3 : NO2	2.0275	0.043 *

**Codes significatifs : 0 '\*\*\*\*' 0.001 '\*\*\*' 0.01 '\*\*' 0.05 '\*'**

## Modèle synthétique de la succession

Une analyse de correspondance canonique (ACC) a été réalisée sur la moyenne mensuelle de la série dans le but d'évaluer l'interaction entre les différents paramètres environnementaux et le zooplancton. Les axes 1 et 2 expliquent 68% de la variance (43% et 25% respectivement) (Figure 35). Quatre groupes distincts y sont visibles en fonction des saisons.

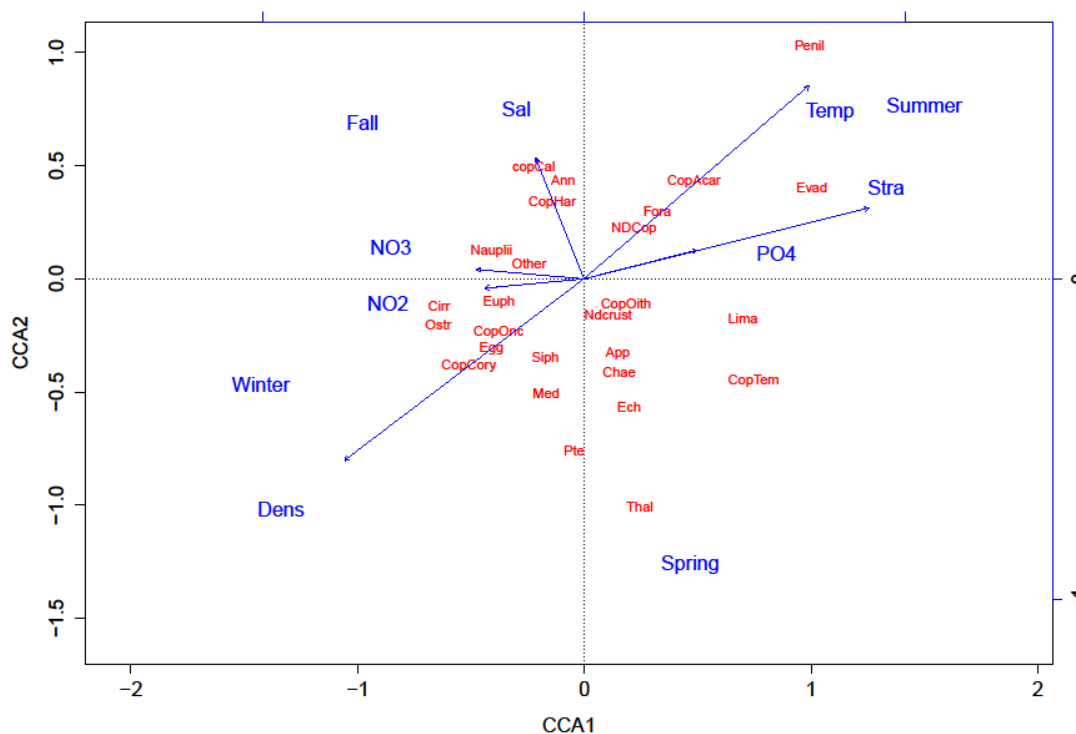


Figure 35 : ACC réalisé sur toute la série zooplanctonique et hydrobiologique en fonction des saisons. En rouge sont représentés les différents taxa, et en bleu, les paramètres physico-chimiques et les saisons. L'axe 1 représente 38.2% et l'axe 2 représente 17.74 % de la variabilité.

Les abréviations utilisées sur le graphique sont : **Stra** : stratification, **Sal** : salinité, **Temp** : température, **Dens** : densité, **Thal** : thaliacés, **Pte** : ptéropodes, **Ech** : larves des échinodermes,

**Med** : méduses, **Chae** : chaetognathes, **Lima** : *Limacina* spp, **Evad** : *Evadne* spp, **Penil** : *Penilia* sp, **Fora** : foraminifères, **App** : appendiculaires, **Ndcrust** : crustacés indéterminés, **Ann** : annélides, **Nau** : larves nauplii, **Siph** : siphonophores, **Euph** : larves euphausiacés, **Cirr** : larves cirripèdes, **Ostr** : ostracodes, **Egg** : œufs, **Other** : autres zooplancton non identifiés, **CopTem** : *Temora* spp, **CopOith** : *Oithona* spp, **CopHar** : harpacticoïdes, **CopCal** : *Calanus* spp, **CopOnc** : *Oncaea* spp, **CopCory** : *Corycaeus* spp, **CopAcar** : *Acartia* spp, **NDCop** : copépodes indéterminés.

Le premier groupe se situe dans la partie négative des deux axes. Durant l'hiver, la colonne d'eau est caractérisée par une homothermie verticale ayant les températures les plus faibles. Les apports continentaux riches en éléments nutritifs favorisent à leur tour le développement des populations phytoplanctoniques dans le milieu. Ceci induit un développement zooplanctonique correspondant aux copépodes (les *Corycaeus* et les *Oncaea* spp), aux ostracodes, aux organismes gélatineux (les siphonophores et les méduses) et aux larves euphausiacés et cirripèdes.

Le deuxième groupe se situe dans la partie positive de l'axe 1 et la partie négative de l'axe 2 et correspond au printemps. La biomasse du zooplancton augmente au maximum suite au bloom phytoplanctonique printanier. On trouve essentiellement les herbivores tels que les copépodes du genre *Oithona*, *Temora*, les appendiculaires, les *Limacina* spp, les ptéropodes et les larves d'échinodermes, ainsi que les carnivores comme les chaetognathes et les thaliacés.

Le troisième groupe situé dans la partie positive des deux axes 1 et 2 correspond à l'été. Durant cette saison, l'eau de surface s'échauffe et la thermocline s'installe. On observe un déficit en éléments nutritifs, une chute phytoplanctonique et un maximum dans la population zooplanctonique dans la colonne d'eau ce qui suggèrent un recrutement probable de crustacés juvéniles. Le pic majeur estival est caractérisé par la présence des *Acartia* spp et des copépodes non identifiés, des cladocères du genre *Evadne* et *Penilia* et des foraminifères.

Enfin, le quatrième groupe se situe dans la partie négative de l'axe 1 et la partie positive de l'axe 2 et correspond à la saison d'automne. Durant cette période, la thermocline s'atténue suite à la diminution de la température de l'eau de surface et la consommation des éléments nutritifs est quasi-totale. A ce stade, la communauté phytoplanctonique évolue vers une dominance des nanoplanctons et des dinoflagellés. On remarque un développement des organismes zooplanctoniques caractérisé par la présence des harpacticoïdes et des *Calanus* spp, des larves nauplii et des annélides.

## Conclusion

Dans ce chapitre, on a analysé le cycle annuel des paramètres hydrologiques (température, salinité, densité et stabilité), des éléments nutritifs (orthophosphates, nitrates et nitrites) et des paramètres biologiques (chl-*a*, phytoplancton et zooplancton) de la série temporelle dans l'écosystème pélagique des eaux côtières libanaises. Les résultats montrent une relation significative qui existe entre les structures hydrographiques et les variations annuelles de la communauté planctonique. Il semble évident que la couche de surface au point B2 est riche en éléments nutritifs. Donc, nous pouvons constater que l'enrichissement de cette région a comme origine l'activité anthropique constituant les éléments essentiels de l'enrichissement de ce milieu. De même, la région est caractérisée par une stratification thermique affectant le développement du phytoplancton ainsi que celui du zooplancton. Les copépodes sont les composantes majeures de la communauté zooplanctonique (~80%) avec la dominance des cyclopoïdes, représentés par le genre *Oithona*, suivis par les appendiculaires, les annélides et les cladocères du genre *Evadne*. En revanche, les organismes gélatineux et les chaetognathes occupent la quasi-totalité du biovolume.

La communauté zooplanctonique montre une biomasse maximale au printemps coïncidant avec le développement phytoplanctonique ; par contre, les abondances présentent un maximum en été suggérant la possibilité de recrutement des juvéniles des crustacés planctoniques. Ces résultats soulèvent la question sur les changements de taille dans l'écosystème au cours d'une année. Il faut avouer que l'étude du zooplancton est un peu complexe vue qu'elle présente différentes interactions avec les divers facteurs environnementaux. Or, cette étude saisonnière a été indispensable pour avoir une idée générale sur la succession écologique des groupes du zooplancton en relation avec les facteurs environnementaux et leur évolution au point B2.

## Chapitre 4 : La variabilité interannuelle de l'abondance et de la composition du zooplancton dans les eaux côtières libanaise (point B2)

### Introduction

Le zooplancton est soumis en permanence aux forçages/changements physiques dans la colonne d'eau. Par conséquent, il est considéré comme un indicateur biologique des changements hydrologiques et climatiques (Beaugrand and Ibanez 2004 ; Fernández de Puelles et al. 2007 ; Beaugrand and Goberville 2010). Le changement climatique affecte la Méditerranée et a une influence grandissante sur son ensemble biologique. Une augmentation de la température de surface a été mise en évidence dans ses différentes régions, surtout dans la partie Est (Nykjaer 2009 ; Skliris et al. 2012 ; Shaltout and Omstedt 2014). En revanche, des changements importants au niveau de la circulation des masses d'eaux profondes ont été détectés au début des années 90 dans son bassin Est, attribués à l'EMT (Milot 2005 ; Roether et al. 2007 ; Schröder et al. 2006 ; Bergamasco and Malanotte-Rizzoli 2010). L'EMT-like, un phénomène similaire à l'EMT mais sans aucune interaction significative avec l'atmosphère, a été recensé de nouveau dans la région à partir de 2005 et a causé une augmentation de la salinité dans toute la colonne d'eau (Velaoras et al. 2014 ; Krokos et al. 2014 ; Theocharis et al. 2014). Ce qui fait du bassin levantin une région sensible et particulièrement vulnérable aux changements environnementaux qui se répercutent sur la variation de l'abondance et de la structure de la communauté zooplanctonique. Dans ce cas, les suivis à long terme constituent un outil adéquat/verrou dans la détection de ces changements (Perry et al. 2004 ; Alheit and Bakun 2010 ; Mackas and Beaugrand 2010).

Pour combler l'absence de vision synoptique autour de la station B2, on a procédé à une étude de données satellitaires (température, couleur de l'eau) et de la base de données MODIS (salinité) réalisée par Delpech (2015). L'objectif a été d'évaluer la distribution et la variabilité interannuelle de la chlorophylle-*a* et de la température dans le bassin Levantin et en particulier autour du point d'échantillonnage de la série de zooplancton. L'hypothèse est de tester si les années EMT-like sont plus riches biologiquement dans le bassin Levantin que les années non

EMT-like. Au cours de l'analyse, la zone côtière distante de 5 km a été exclue afin de s'affranchir des blooms côtiers liés à des apports en nutriments d'origine continentale. D'après l'analyse des composantes principales (ACP), une tendance significative de la température à la surface de l'eau a été démontrée dans le bassin Est de la Méditerranée (Figure 36), ce qui confirme les observations précédentes dans la région qui pointent sur le réchauffement global du bassin. On note aussi un gradient croissant du Nord vers le Sud du bassin. Les années 2005 - 2006 apparaissent être les années les plus froides avec une chute brusque de la température de l'eau de surface.

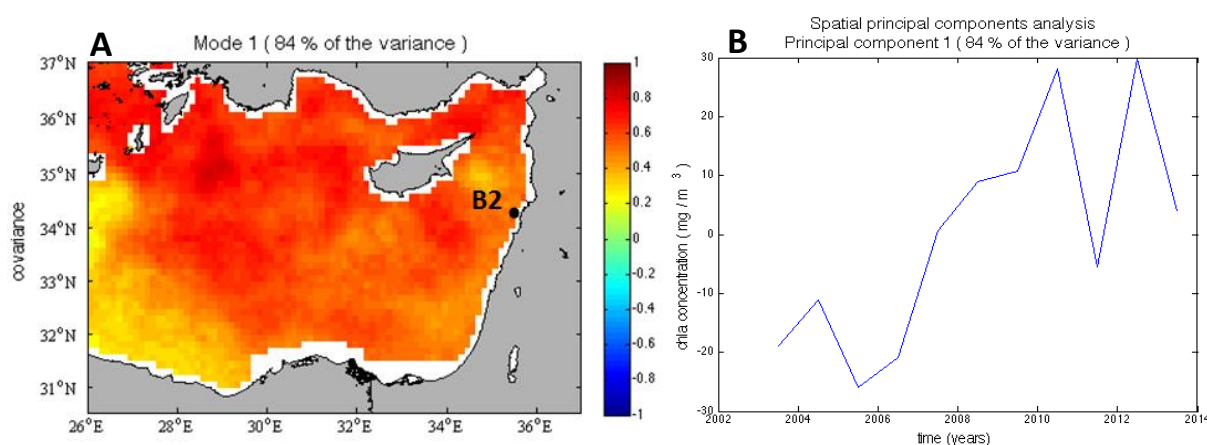


Figure 36 : A) Carte représentant le mode 1 de l'analyse en composantes principales de la température (ACP) et B) la première composante principale de la température de surface du bassin Levantin dans la Méditerranée orientale entre 2003 et 2014 (selon Delpech (2015)).

La salinité a présenté une augmentation de 2005 à 2010 dans l'ensemble du bassin selon un gradient croissant Ouest-Est. Ce résultat est en accord avec Kress et al. (2014), Krokos, Velaoras, Korres, Perivoliotis and Theocharis (2014) ; (cette étude) (Figure 37). De plus, un gradient croissant de corrélation à l'axe 2 est noté du Nord vers le Sud du bassin. Ceci indique que l'augmentation de la salinité dans la partie Sud du bassin a été plus basse après 2007 (Figure 38). Il est possible que cette basse de salinité soit dû à un changement potentiel dans la circulation de surface de l'EAM (Eaux Atlantiques Modifiées) (Bergamasco and Malanotte-Rizzoli 2010). L'ensemble de ces résultats montre donc une relative synopticité des changements physiques en cohérence avec les études précédentes et que le point B2 n'a pas été singulier.



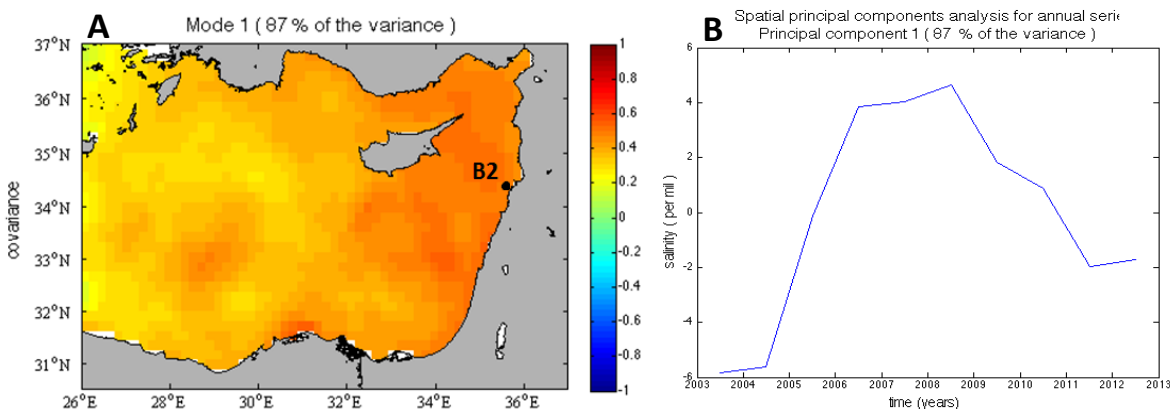


Figure 37 : A) Carte représentant le mode 1 de l'analyse en composantes principales (ACP) et B) la première composante principale de la salinité à la surface du bassin Levantin dans la Méditerranée orientale entre 2003 et 2014 (selon Delpech (2015)).

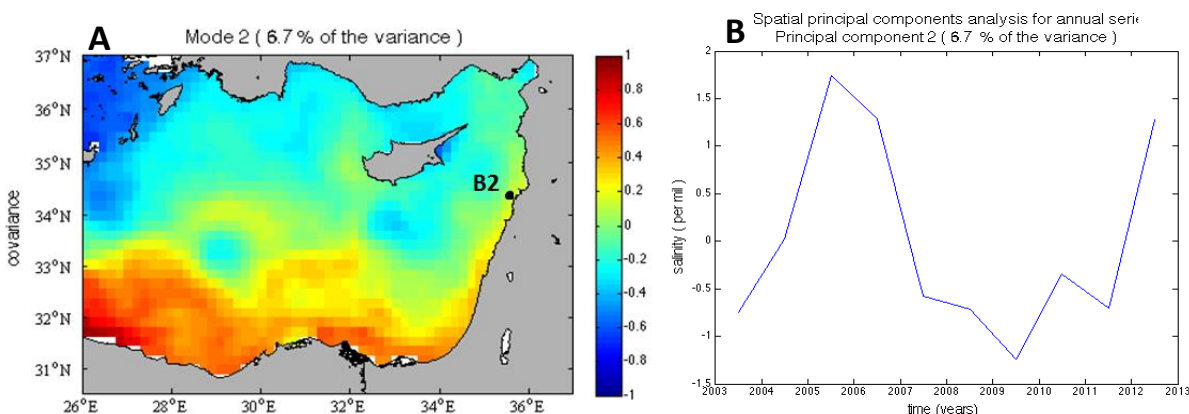


Figure 38 : A) Carte représentant le mode 2 de l'analyse en composantes principales (ACP) et B) la première composante principale de la salinité à la surface du bassin Levantin dans la Méditerranée orientale entre 2003 et 2014 (selon Delpech (2015)).

Concernant l'évolution de la Chlorophylle-*a* par satellite, on s'aperçoit que, dans l'espace, tout dépend principalement de ce qui va se passer dans le tourbillon de Rhodes (Figure 39). D'une manière générale, une augmentation de la chlorophylle-*a* a été mise en évidence dans tout le bassin Est de la méditerranéen en 2005, tout en synchronisant le déclenchement de l'EMT-like. Cette augmentation était remarquable surtout au niveau du tourbillon des îles de Rhodes dans la partie Nord-Ouest situé à proximité de la source de formation des eaux profondes égéennes. De même, on note un gradient décroissant du Nord vers le Sud du bassin. Suite à ce changement, la concentration chlorophyllienne a subi une diminution progressive jusqu'à l'année 2008.

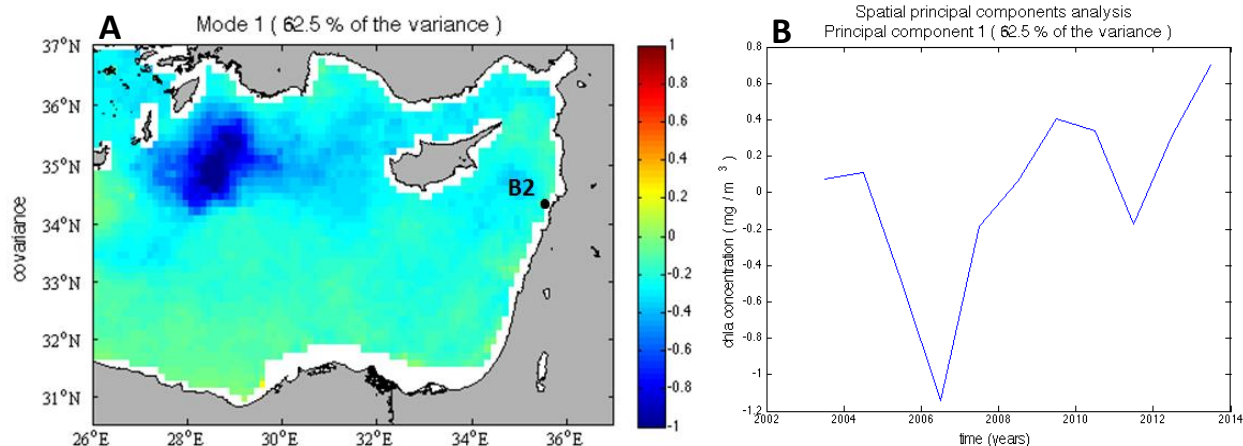


Figure 39: A) Carte représentant le mode 1 de l'analyse en composantes principales (ACP) et B) la première composante principale de la distribution spatiale de la chlorophylle-*a* issue de l'analyse d'images satellitaires MODIS au niveau du bassin Levantin dans la Méditerranée orientale entre 2003 et 2014 (selon Delpech (2015)).

Dans ce chapitre on présente pour la première fois, les données des paramètres, physico-chimiques et biologiques, incluant les différents taxa zooplanctoniques de la seule série temporelle existante dans le bassin levantin pendant la période de 2000 à 2013. Apparemment, le point B2 n'est pas soumis seulement à une variabilité à courte échelle de temps, mais simultanément aussi à une variabilité à différentes échelles. Le but de ce travail est **i)** d'expliquer la variabilité interannuelle du zooplancton de la série temporelle au point B2 selon 3 échelles : à long terme, l'évolution interannuelle et à court terme et **ii)** de caractériser le mécanisme sous-jacent qui affecte le plus la communauté zooplanctonique dans les eaux libanaises.

On a testé la présence des signaux de réchauffement climatique émergents à la surface et dans la colonne d'eau, des signaux de l'arrivée de l'EMT-like et des apports continentaux anthropiques riches en éléments nutritifs. On a montré également le niveau de la réponse de la communauté marine pélagique à ces changements ainsi que les cycles saisonniers et interannuels conduisant à un décalage ou une correspondance avec les études précédentes.

## Résultats

Dans ce chapitre, on présente les cycles annuels des paramètres météorologiques (précipitations et vitesses de vent) (<http://www.windguru.cz/int/>) de la région de Batroun entre 2003 et 2013. On présente également les résultats hydrologiques et biogéochimiques qui sont

limitées à l'intégration des soixante premières mètres à cause de l'absence de certaine mesure pour la majorité des paramètres biogéochimiques au niveau de 80 m durant les quatre premières années.

### **Variabilité interannuelle des paramètres météorologiques**

Les moyennes mensuelles de la précipitation enregistrées dans la région de Batroun (Figure 32) fluctuent entre un minimum de zéro (pendant les saisons d'été) et un maximum de 162 mm (automne 2004) (Figure 40 A). Le cycle saisonnier est bien représenté avec des valeurs faibles au printemps et quasi nulles en été (Figure 40 B). Les moyennes annuelles sont supérieures à la moyenne totale de la série pour la période entre 2003 et 2006 et en 2009 et inférieures pour le reste des années (Figure 40 C). Aucune tendance générale significative ( $p > 0.05$ ) n'a été détectée dans la série des précipitations.

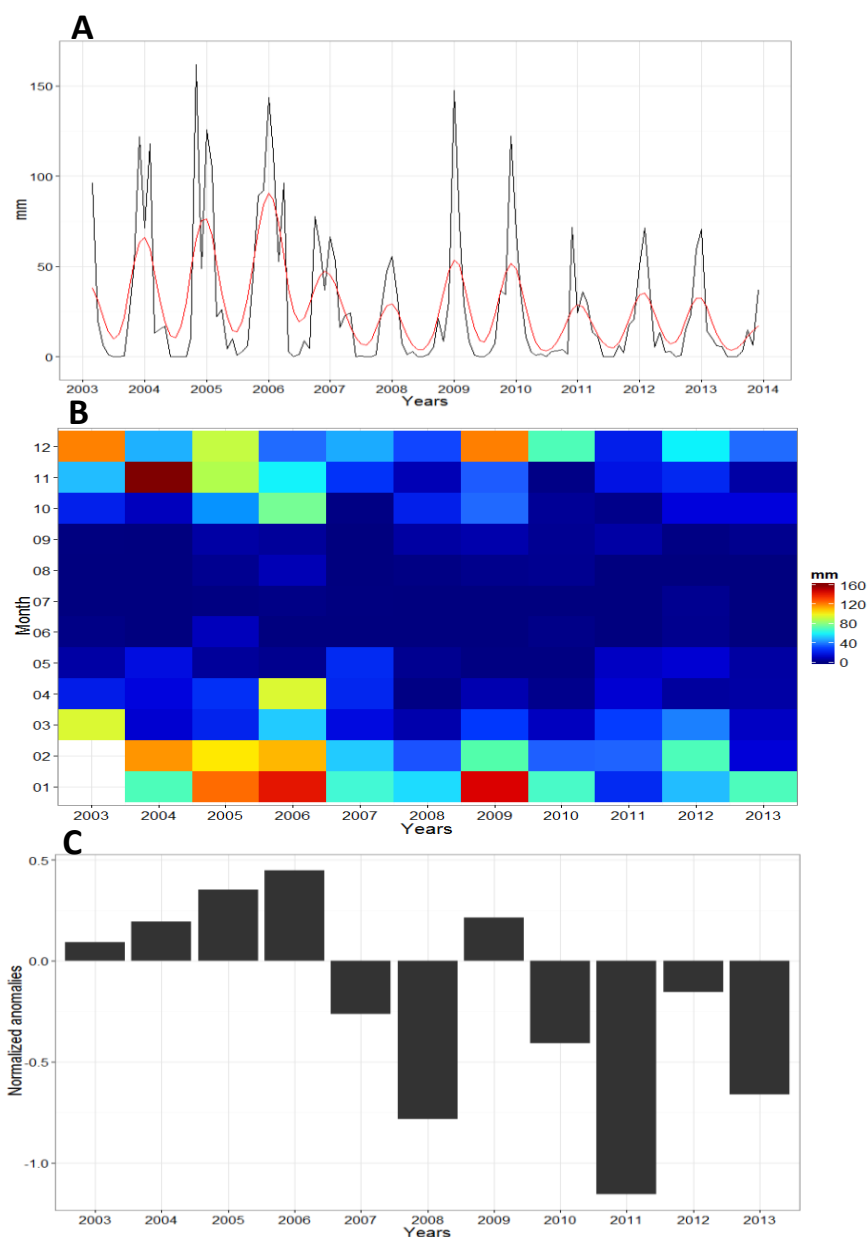


Figure 40 : Précipitations (A) en moyenne mensuelle (ligne noire) et moyenne annuelle mobile (ligne rouge); (B) variabilité interannuelle et saisonnière, les cases blanches représentent les mois sans valeurs ; (C) déviation de la moyenne annuelle par rapport à la moyenne de la série, normalisée par l'écart-type de la série temporelle à Batroun (2003-2013).

La vitesse moyenne du vent fluctuent entre un minimum de  $2.3 \text{ m.s}^{-1}$  (automne 2004) et un maximum de  $5.98 \text{ m.s}^{-1}$  (hiver 2010) (Figure 41 A). La vitesse du vent est remarquable entre la fin de la saison d'automne et le début du printemps (Figure 41 B). Les moyennes annuelles sont inférieures à celle totale de la série pour la période entre 2004, 2006, 2007 et 2011 et

supérieures pour le reste des années (Figure 41 C). Aucune tendance générale significative ( $p > 0.05$ ) n'a été détectée dans la vitesse du vent.

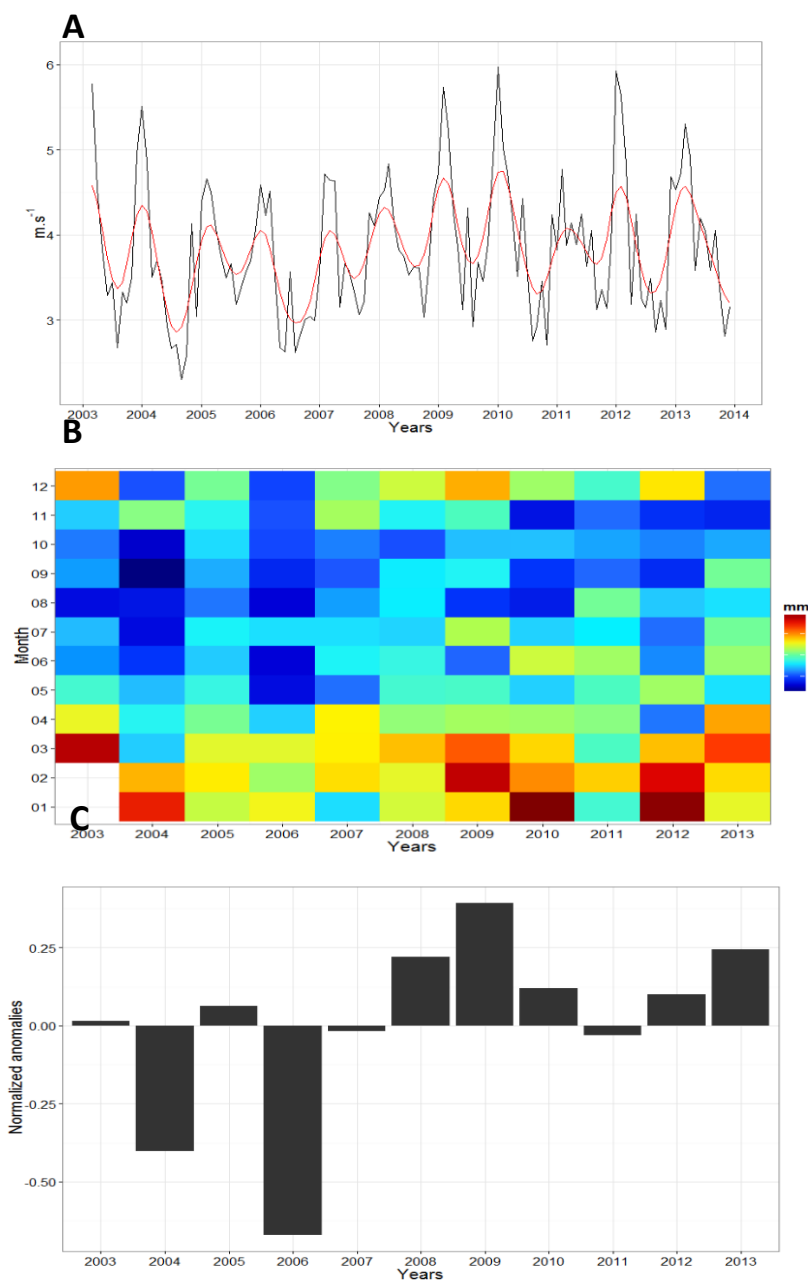
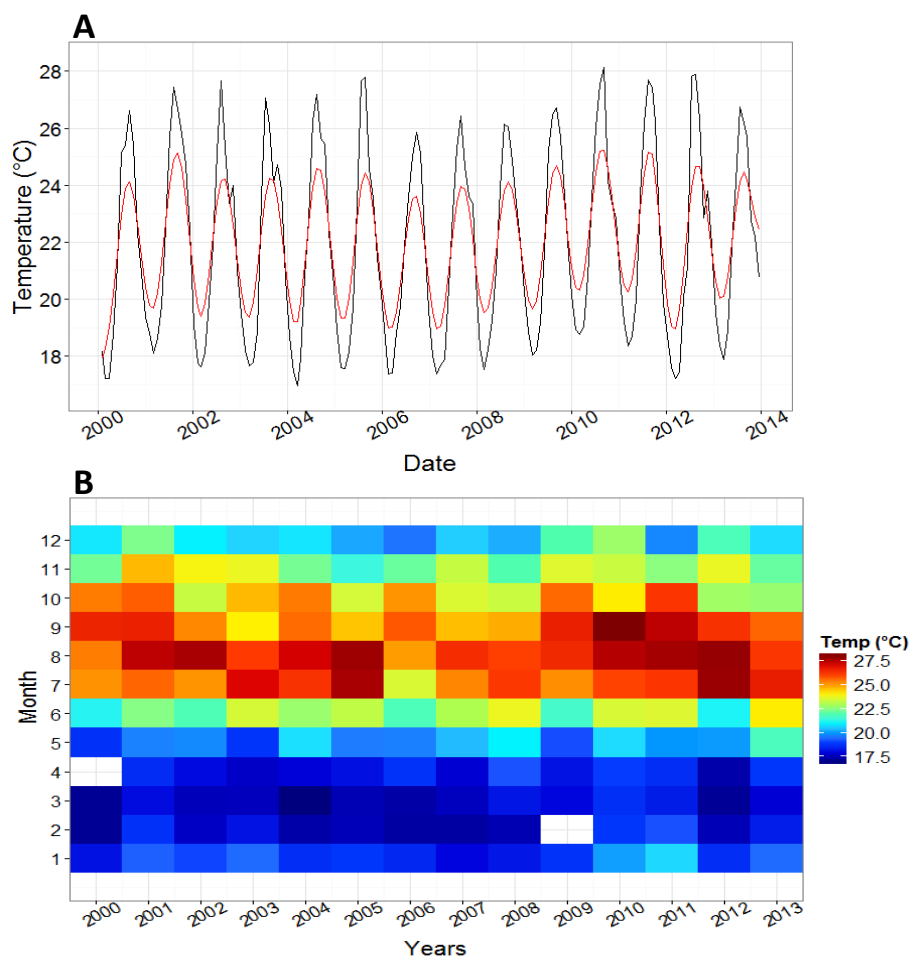


Figure 41 : Vitesse du vent (A) en moyenne mensuelle (ligne noire) et moyenne annuelle mobile (ligne rouge); (B) variabilité interannuelle et saisonnière, les cases blanches représentent les mois sans valeurs ; (C) déviation de la moyenne annuelle par rapport à la moyenne de la série, normalisée par l'écart-type de la série temporelle à Batroun (2003-2013).

## Variabilité interannuelle des paramètres hydrologiques

La température moyenne de la colonne d'eau mesurée au point B2 (Figure 42) varie entre un minimum en hiver 2004 (16.9 °C) et un maximum en été 2010 (28.1 °C, Figure 42 A). La température moyenne commence à s'élever à partir du mois de mai jusqu'au janvier et arrive au maximum en août – septembre où cette période se caractérise par la présence de la thermocline. Entre novembre et avril, on observe l'homothermie et la température est à son minimum (Figure 42 B). Aucune tendance générale significative ( $p > 0.05$ ) ou changement de phénologie n'a été détectée dans la série de la température. La température moyenne annuelle entre 2001 et 2009-2011 et 2013 est supérieure à celle de la moyenne de toute la série avec une augmentation du maxima. Tandis que c'est l'inverse pour les autres périodes (Figure 42 C).



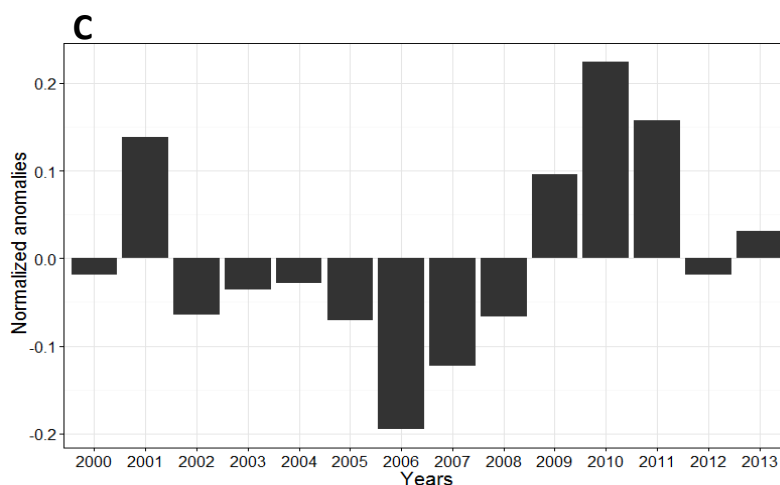


Figure 42 : Moyennes des Températures moyennes dans la colonne d'eau (A) en moyenne mensuelle (ligne noire) et moyenne annuelle mobile (ligne rouge); (B) variabilité interannuelle et saisonnière pour toute la colonne d'eau, les cases blanches représentent les mois sans valeurs ; (C) déviation de la moyenne annuelle par rapport à la moyenne de la série, normalisée par l'écart-type de la série temporelle au point B2 (2000-2013).

L'amplitude interannuelle de la variation de la salinité est plus notable que celle de la température (Figure 43). La salinité varie entre un minimum de 38.684 (hiver 2004) et un maximum de 39.647 (automne 2006) (Figure 43 A). Le cycle saisonnier de la salinité est bien représenté avec une certaine différence interannuelle mais pas de tendance nette de changement graduel de la phénologie. Le minimum est enregistré normalement entre mars et juin et le maximum entre juillet et janvier (Figure 43 B). Aucune tendance générale significative ( $p > 0.05$ ) n'a été détectée dans la série de la salinité. La moyenne annuelle des salinités est supérieure à celle de la série pour les années entre 2000-2001 et 2006-2010 (Figure 43 C).

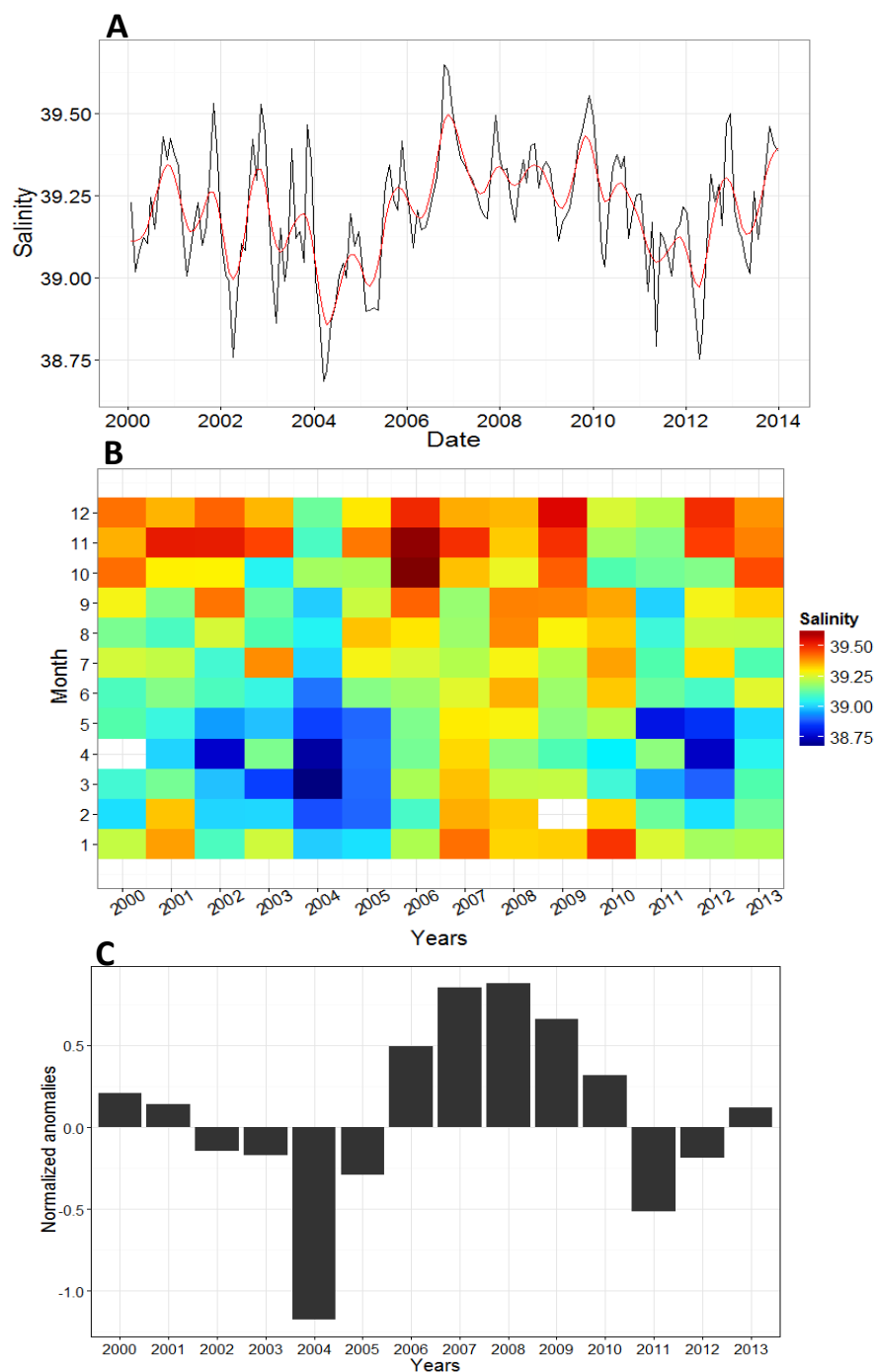
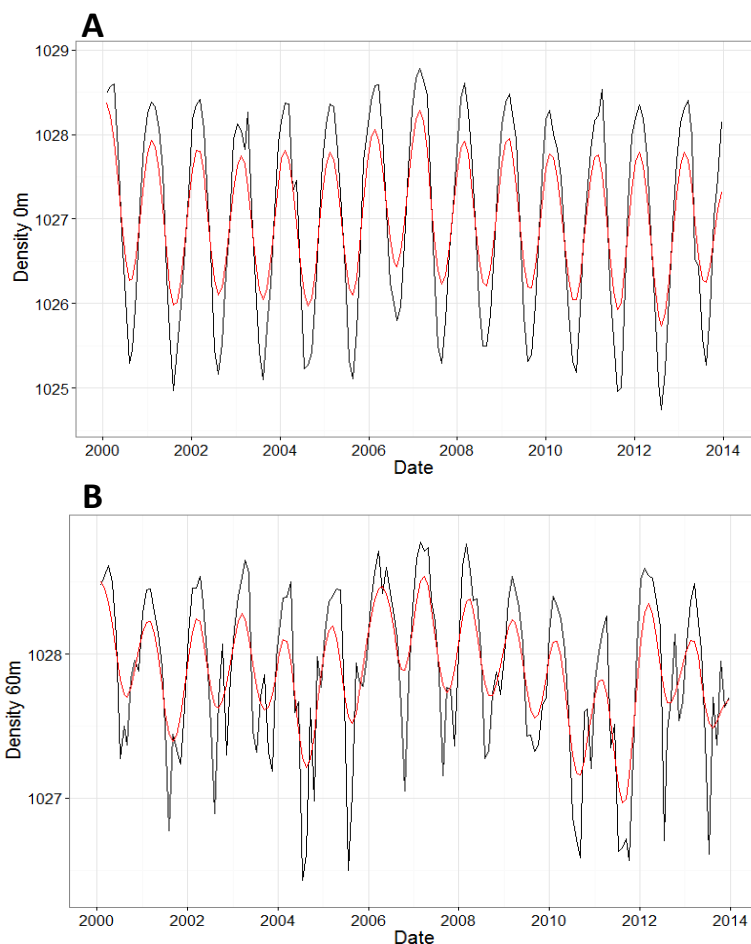


Figure 43: Moyennes des Salinités moyennes dans la colonne d'eau (A) en moyenne mensuelle (ligne noire) et moyenne annuelle mobile (ligne rouge); (B) variabilité interannuelle et saisonnière, les cases blanches représentent les mois sans valeurs ; (C) déviation de la moyenne annuelle par rapport à la moyenne de la série, normalisée par l'écart-type de la série temporelle au point B2 (2000-2013).

La densité mesurée au point B2 (Figure 44) montre que le minimum varie entre 1024.7 (été 2012) à 0 m et 1026.4 (été 2004) à 60 m et le maximum est 1028.8 (hiver 2007) à 0 et 60 m



(Figure 44 A, B). Le cycle saisonnier est bien représenté avec des valeurs faibles enregistrées en été (entre juillet et septembre) (Figure 44 C, D). Une différence interannuelle est remarquée au niveau de la couche de 60 m où la densité augmente entre 2006 et 2009 même en été. Aucune tendance ( $p > 0.05$ ) n'a été détectée pour la densité et pas de changement graduel de la phénologie. La salinité moyenne annuelle est inférieure à celle de la série an 2001, 2004, 2010, 2011 et 2013 (Figure 44 E).



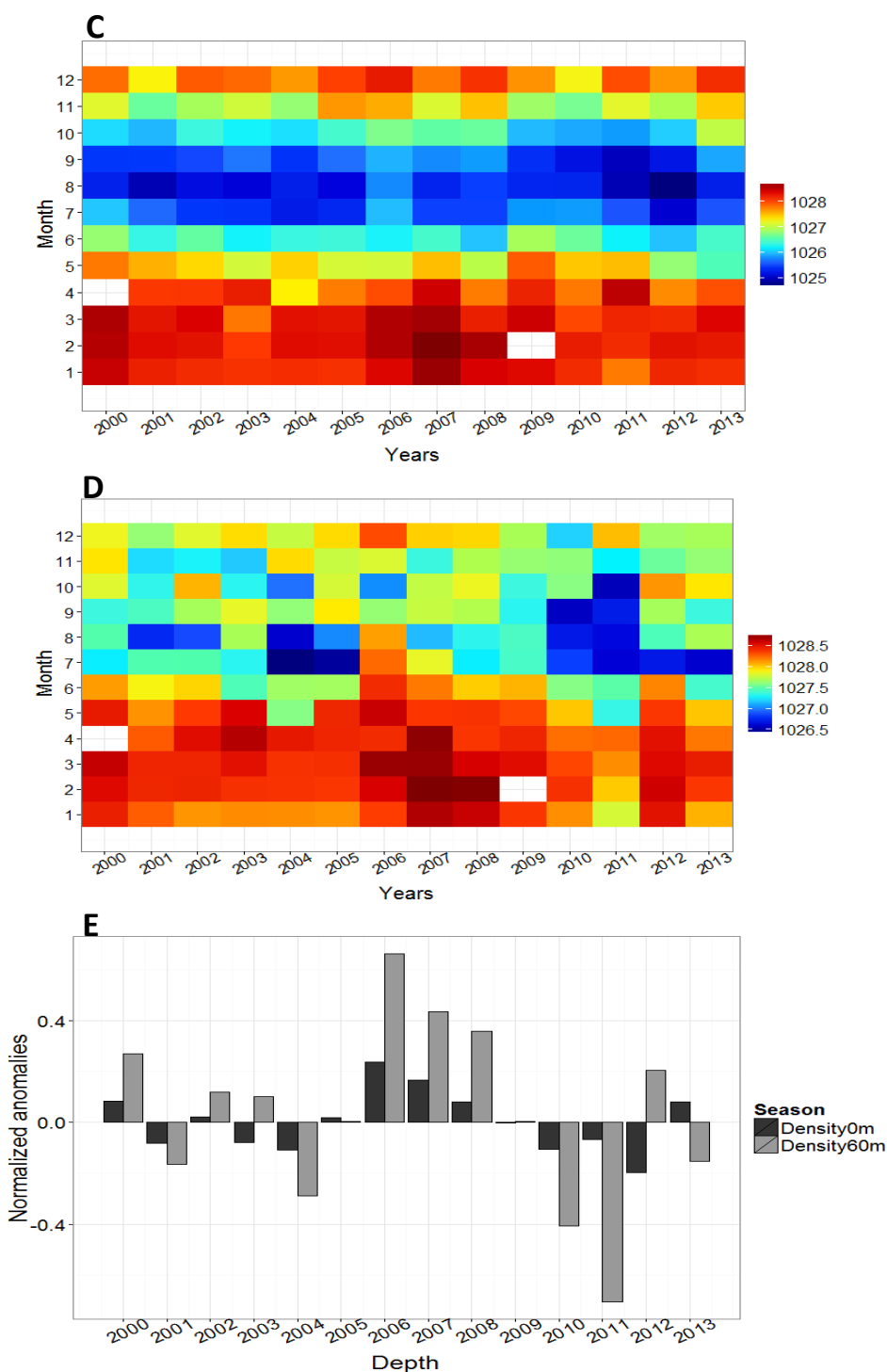


Figure 44 : Densité (A) dans couche de surface à 0 m et (B) à 60 m de profondeur en moyenne mensuelle (ligne noire) et moyenne annuelle mobile (ligne rouge); variabilité interannuelle et saisonnière (C) à 0 m et (D) à 60 m, les cases blanches représentent les mois sans valeurs ; (E) déviation de la moyenne annuelle par rapport à la moyenne de la série, normalisée par l'écart-type à 0m et 60 m de la série temporelle au point B2 (2000-2013).

La stabilité de la colonne d'eau (Figure 45) est calculée à partir de la différence de densité des deux profondeurs 0 et 60 m (voir Chapitre 2 - Matériels et méthodes). En hiver, elle varie entre -1.216 (2011) et 6.099 (2003), tandis qu'elle fluctue entre 21.068 (2010) et 37.998 (2012) (Figure 45 A). La stratification de la colonne d'eau s'établit toujours durant la période chaude et commence entre avril – mai et se termine en novembre (Figure 45 B). Elle est maximale pendant la période estivale et minimale pendant la période hivernale. On constate que les valeurs de la stabilité ont été supérieures à celle de la série en hiver 2003, 2006, 2010 et 2012 et en été 2001, 2002, 2003, 2006, 2007, 2009 et 2012. Tandis que pour les autres périodes, cette stabilité diminue dans la colonne d'eau. Aucune tendance générale significative ( $p > 0.05$ ) n'a été détectée dans la stabilité des deux saisons (Figure 45 C).

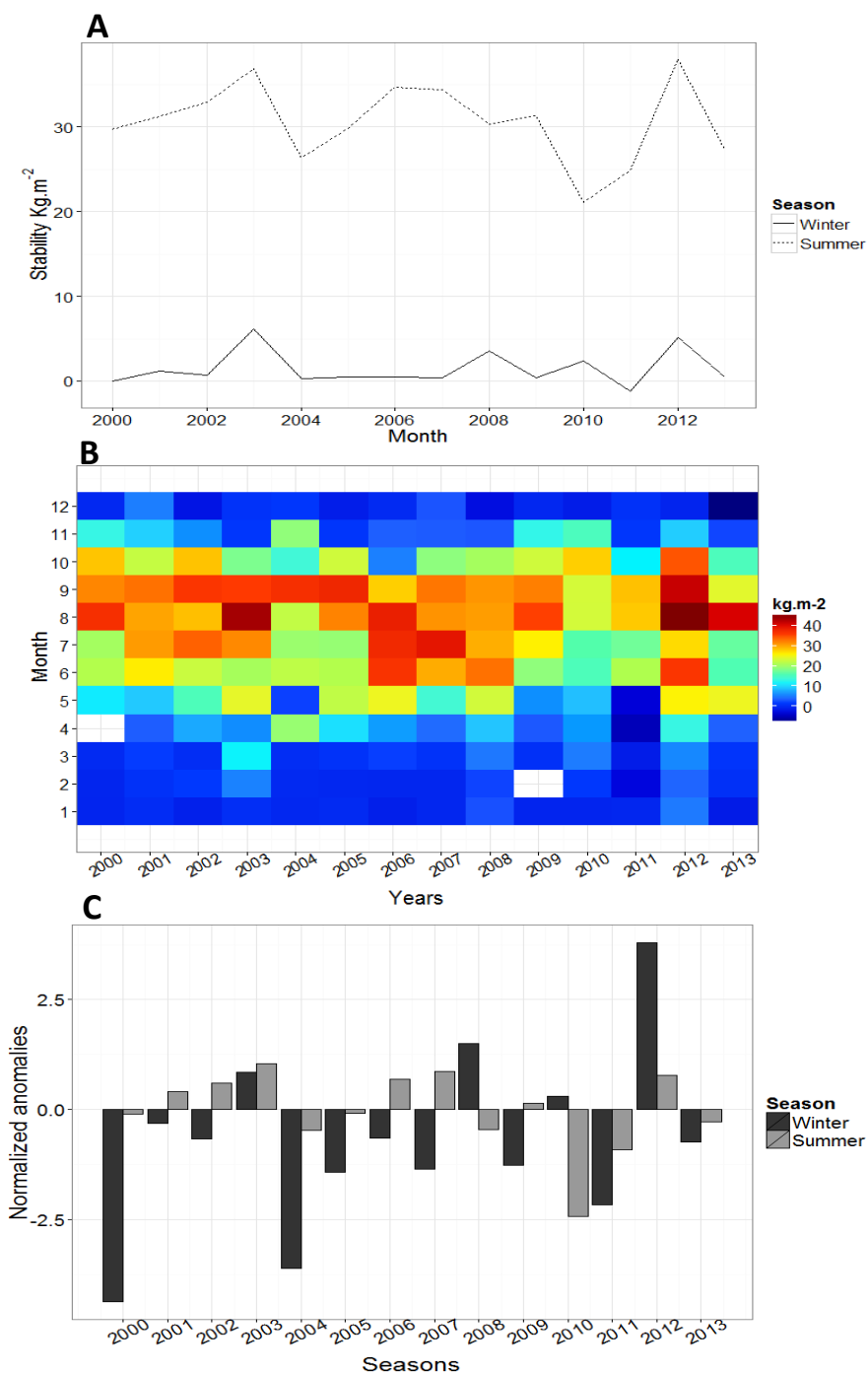
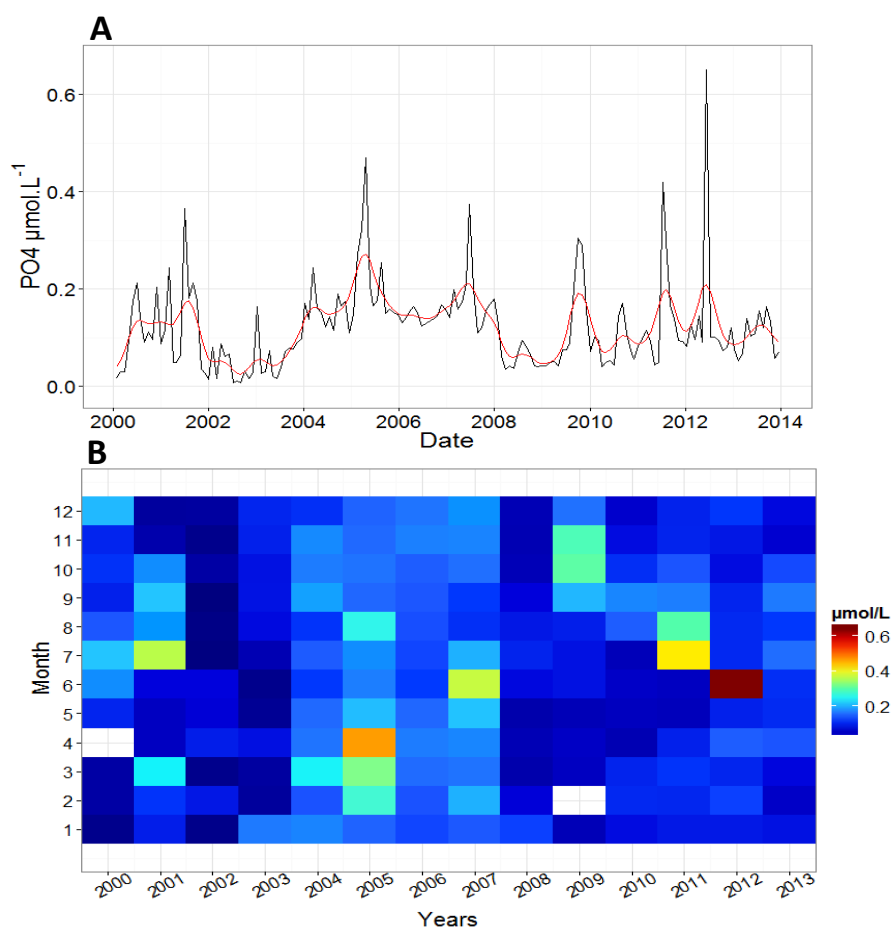


Figure 45 : Moyenne annuelle de la stabilité (A) en hiver et en été dans la colonne d'eau; (B) variabilité interannuelle et saisonnière, les cases blanches représentent les mois sans valeurs ; (C) déviation de la moyenne annuelle par rapport à la moyenne de la série, normalisée par l'écart-type en hiver et en été de la série temporelle au point B2 (2000-2013).

## Variabilité interannuelle des facteurs biogéochimiques

Concernant les éléments nutritifs, les concentrations moyennes des orthophosphates dans la colonne d'eau au point B2 sont représentées dans la Figure 46. On remarque que la concentration moyenne fluctue entre un minimum de  $0.006 \mu\text{M.L}^{-1}$  (été 2002) et un maximum de  $0.65 \mu\text{M.L}^{-1}$  (printemps 2012) (Figure 46 A). Les concentrations annuelles moyennes sont clairement supérieures à celle de la moyenne totale de la série pour la période entre 2004 et 2007 durant toute l'année (Figure 46 B, C). Aucune tendance générale significative ( $p > 0.05$ ) n'a été détectée dans la série des phosphates.



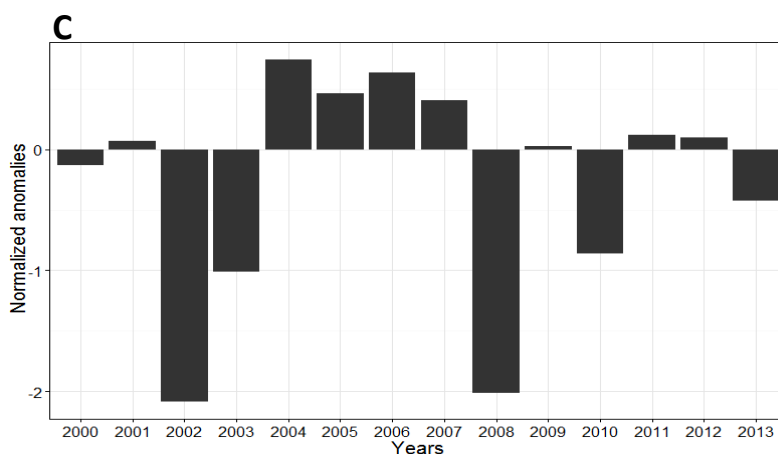


Figure 46: Concentrations moyennes des orthophosphates ( $\mu\text{M.L}^{-1}$ ) dans la colonne d'eau (A) en moyenne mensuelle (ligne noire) et moyenne annuelle mobile (ligne rouge); (B) variabilité interannuelle et saisonnière, les cases blanches représentent les mois sans valeurs; (C) déviation de la moyenne annuelle par rapport à la moyenne de la série, normalisée par l'écart-type de la série temporelle au point B2 (2000-2013).

Les concentrations moyennes des nitrates représentées dans la Figure 47 varient entre un minimum de  $0,043 \mu\text{M.L}^{-1}$  (automne 2013) et un maximum de  $1.417 \mu\text{M.L}^{-1}$  (hiver 2003) (Figure 47 A). Le cycle saisonnier correspondant n'est pas assez évident avec une différence interannuelle claire. On note une concentration importante en 2000, 2003 et 2011 (Figure 47 B). Cependant, la moyenne annuelle est supérieure à celle de la série pour les années 1999, 2000, 2003, 2011 et 2013 (Figure 47 C). Aucune tendance générale significative ( $p > 0.05$ ) n'a été détectée dans la série des nitrates.

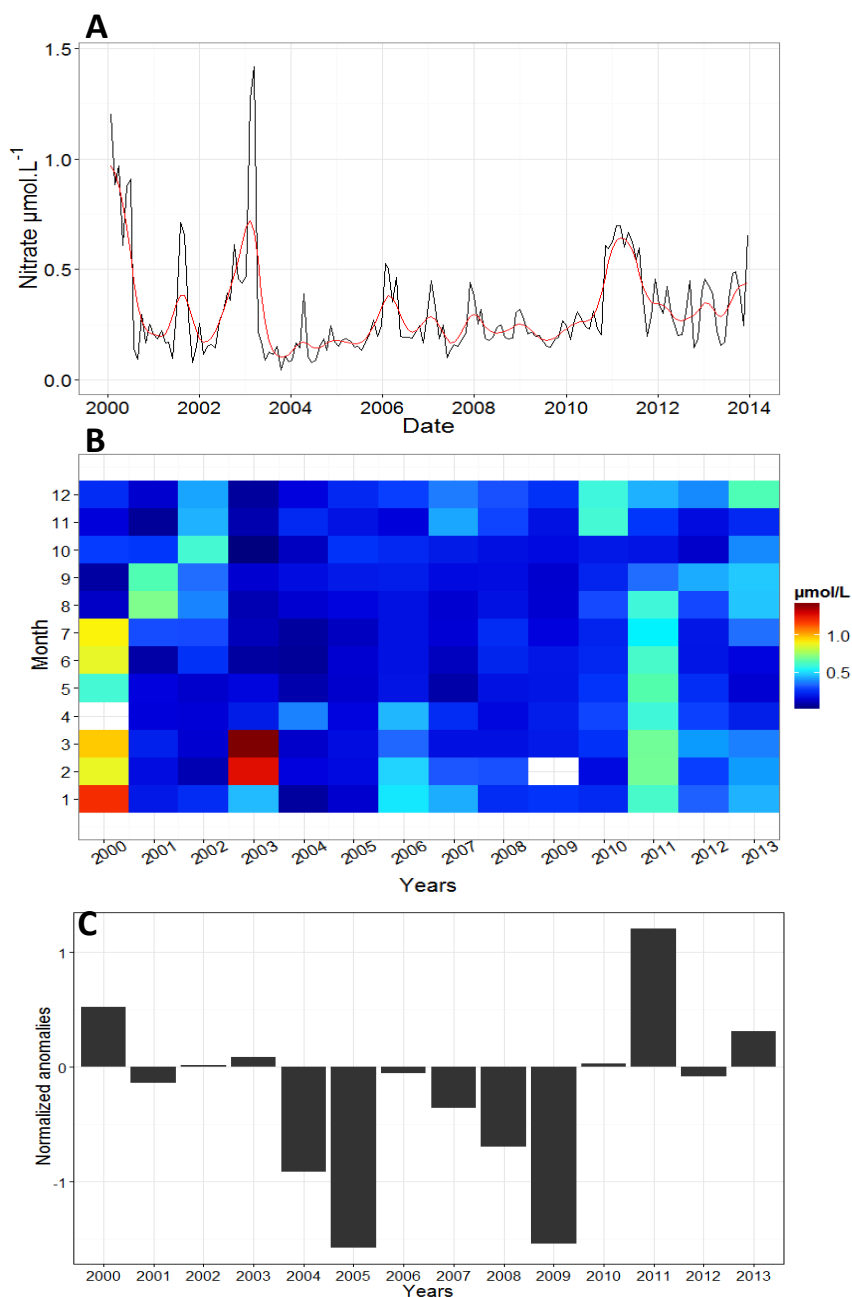


Figure 47 : Concentrations moyennes des nitrates ( $\mu\text{M.L}^{-1}$ ) dans la colonne d'eau (A) en moyenne mensuelle (ligne noire) et moyenne annuelle mobile (ligne rouge); (B) variabilité interannuelle et saisonnière, les cases blanches représentent les mois sans valeurs ; (C) déviation de la moyenne annuelle par rapport à la moyenne de la série, normalisée par l'écart-type de la série temporelle au point B2 (2000-2013).

De même pour les nitrites, les concentrations moyennes mensuelles varient entre un minimum de  $0.008 \mu\text{M.L}^{-1}$  (hiver 2002) et un maximum de  $0.193 \mu\text{M.L}^{-1}$  (hiver 2003) (Figure 48 A). Le cycle saisonnier des nitrites n'est pas trop éclatant avec une différence interannuelle, une concentration élevée est observée en fin d'automne, hiver et printemps (Figure 48 B). Les années

2003 et 2012 étaient chargées en des concentrations élevées de nitrites surtout en hiver. Les concentrations moyennes sont inférieures que celle de la série au début de la série entre 2000 et 2002 et pour les années 2006 et 2013 (Figure 48 C). Une tendance générale significative a été repérée dans la série des nitrates ( $S = 579615.8$ ,  $p < 0.05$ ).

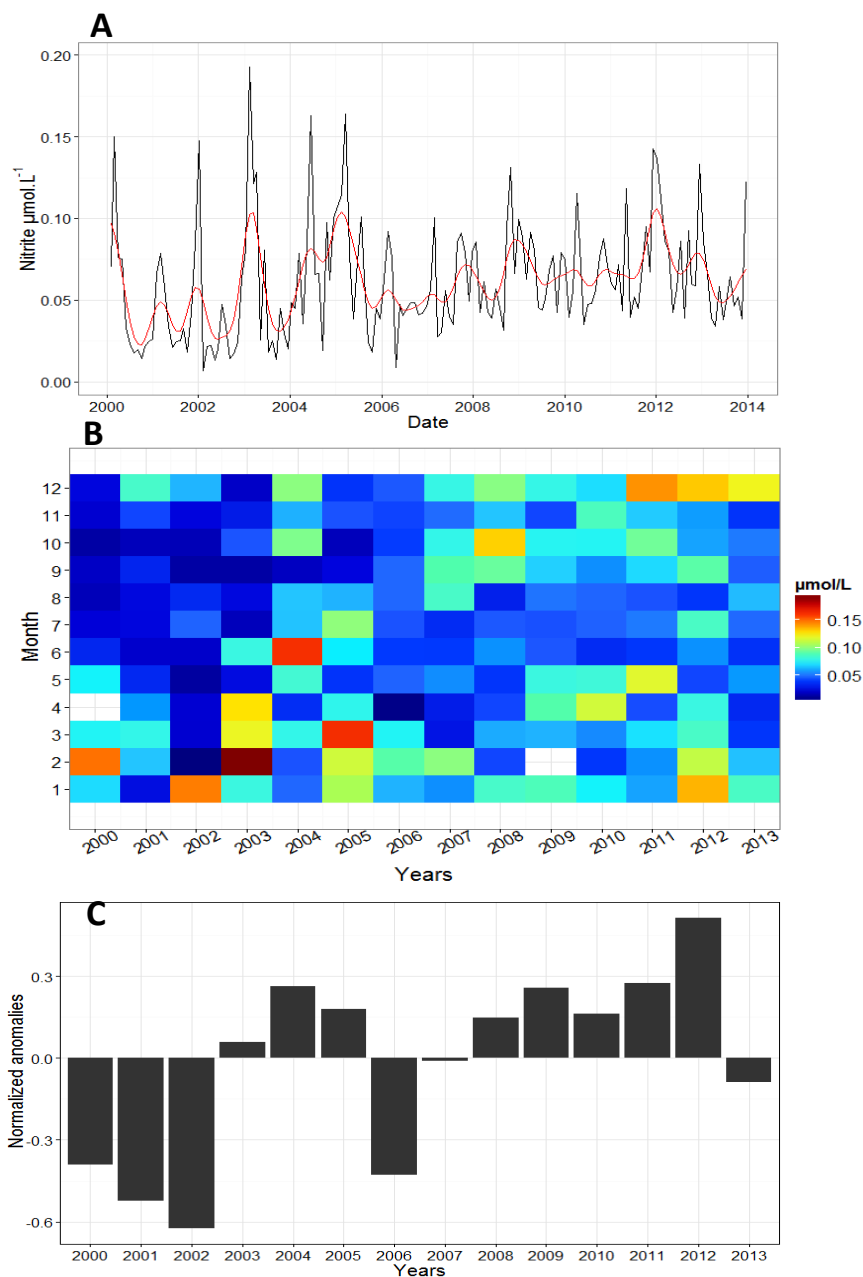


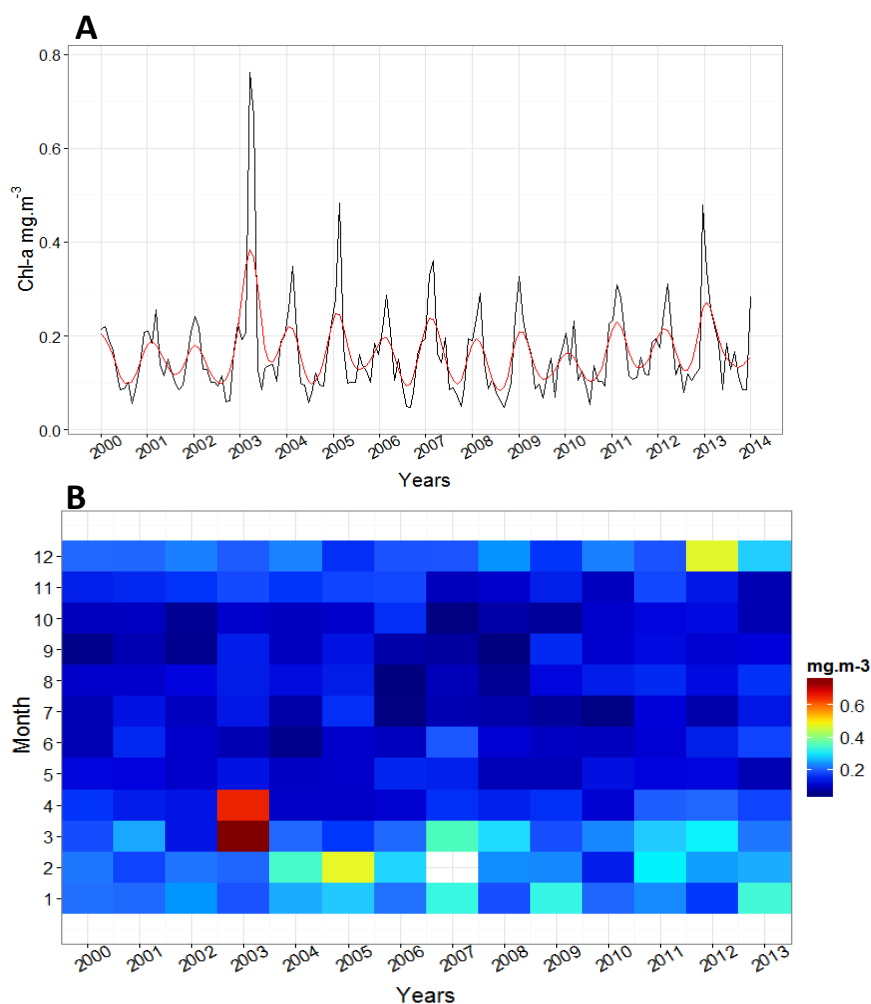
Figure 48 : Concentrations moyennes des nitrites ( $\mu\text{M.L}^{-1}$ ) dans la colonne d'eau (A) en moyenne mensuelle (ligne noire) et moyenne annuelle mobile (ligne rouge); (B) variabilité interannuelle et saisonnière, les cases blanches représentent les mois sans valeurs ; (C) déviation de la moyenne annuelle par rapport à la moyenne de la série, normalisée par l'écart-type de la série temporelle au point B2 (2000 - 2013).



## Variabilité interannuelle du phytoplancton

### Biomasse de la Chlorophylle-*a* par satellite

La concentration interannuelle chlorophyllienne d'origine satellitaire varie entre un minimum de  $0.0483 \text{ mg.m}^{-3}$  (été 2006 et 2008) et un maximum de  $0.7923 \text{ mg.m}^{-3}$  (automne 2003) (Figure 49 A). Les concentrations élevées de la chlorophylle-*a* sont détectées en hiver (Figure 49 B). L'année 2003 représente une concentration exceptionnelle et assez élevée (en mars et avril) où la moyenne annuelle est supérieure à celle de toute la série en plus de 2005 et les années entre 2011 et 2013 (Figure 49 C). Aucune tendance générale significative n'a été détectée dans la série de la chlorophylle-*a* ( $p > 0.05$ ).



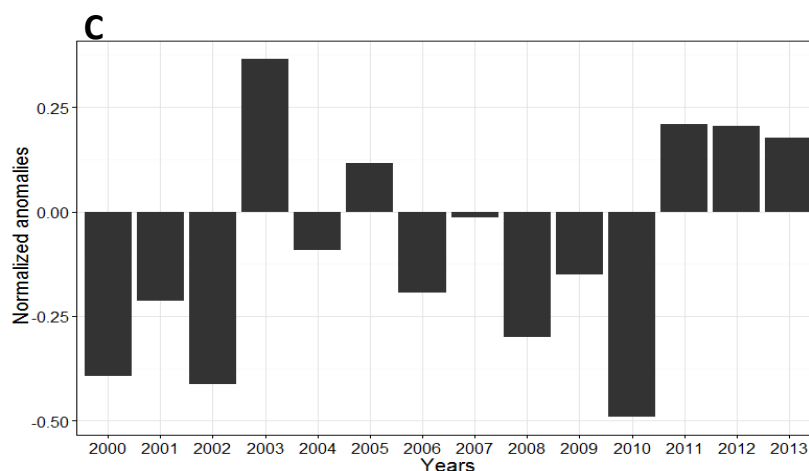


Figure 49 : Concentrations moyennes du chlorophylle  $a$  ( $\text{mg.m}^{-3}$ ) à la surface de l'eau d'origine satellitaire (A) en moyenne mensuelle (ligne noire) et moyenne annuelle mobile (ligne rouge); (B) variabilité interannuelle et saisonnière, les cases blanches représentent les mois sans valeurs ; (C) déviation de la moyenne annuelle par rapport à la moyenne de la série, normalisée par l'écart-type de la série temporelle au point B2 (2000-2013).

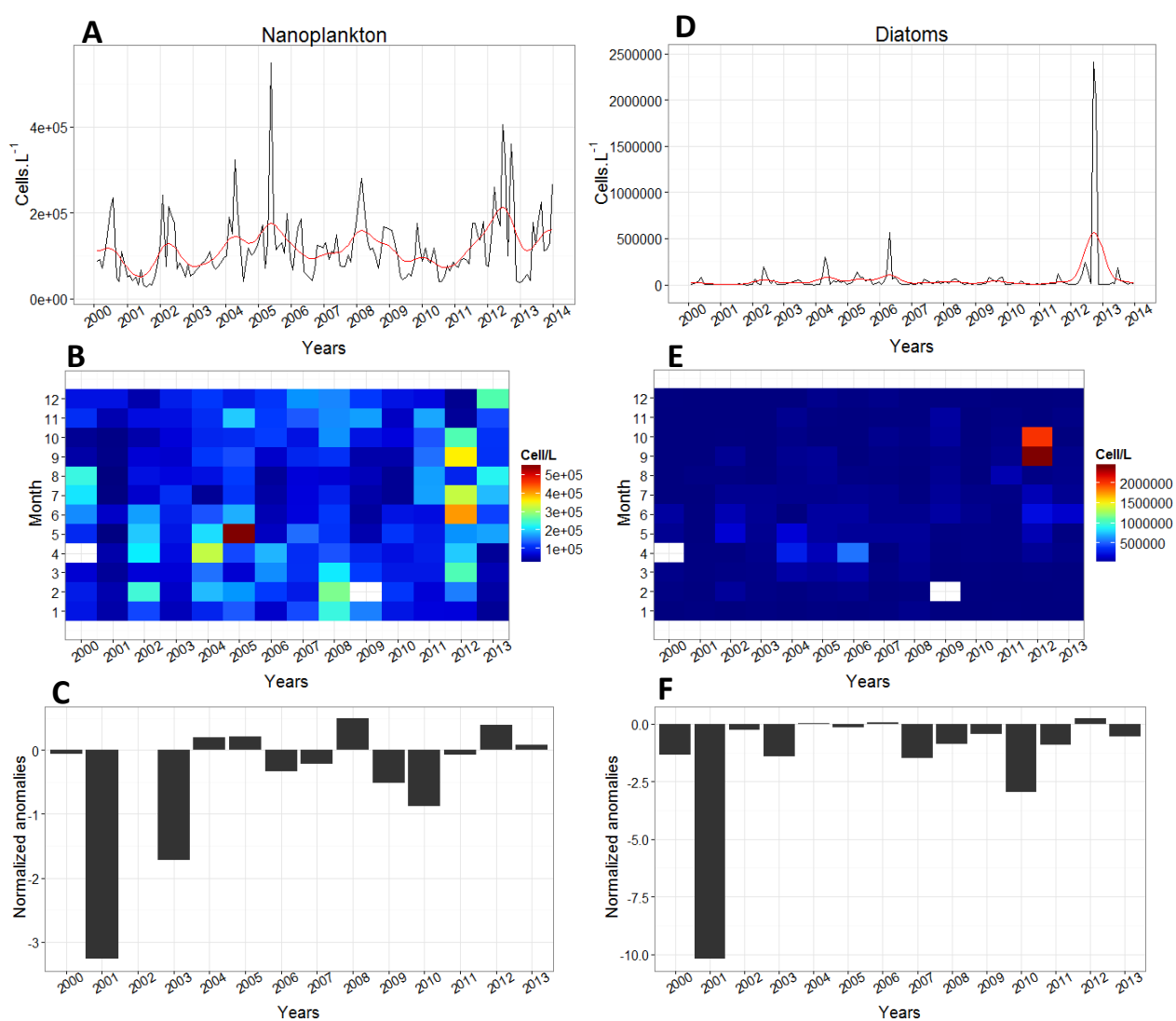
### Comptages cellulaires

Une variabilité interannuelle des principaux groupes phytoplanctoniques (nanoplancton, diatomées et dinoflagellés) est bien marquée dans cette série (Figure 50). La concentration du groupe nanoplanctonique varie entre une moyenne minimale de  $29.5.10^3 \text{ Cellules.L}^{-1}$  en automne 2001 et un maximum de  $548.1.10^3 \text{ Cellules.L}^{-1}$  au printemps 2005 (Figure 50 A). On remarque que l'abondance des nanoplanctons est plus importante au printemps (Figure 50 B). Cette efflorescence diffère d'une année à autre, ils sont plus abondants en 2004, 2005, 2008 et 2012 où les valeurs moyennes sont supérieures à celle de la série qui est de  $118.359.10^3 \text{ Cellules.L}^{-1}$  (Figure 50 C).

Concernant les diatomées, leur concentration varie entre un minimum de  $774.9 \text{ Cellules.L}^{-1}$  en automne 2003 et un maximum de  $2406.6.10^3 \text{ Cellules.L}^{-1}$  en automne 2012 (Figure 50 D). La poussée est principalement au printemps suivis par une deuxième en automne de moindre importance, à l'exception en 2012, la poussée est assez important (Figure 50 E). Les concentrations moyennes annuelles sont supérieures à la moyenne totale de la série en 2004, 2006 et 2012 (Figure 50 F).

De même pour les dinoflagellés, les concentrations fluctuent entre un minimum de  $2457.9 \text{ Cellules.L}^{-1}$  en 2013 et un maximum de  $36.729.10^3 \text{ Cellules.L}^{-1}$  en 2003 (Figure 50 G).

La poussé atteint le maximum au printemps et en été à l'exception des années entre 2006 et 2009 où la population des dinoflagellés témoignent une présence permanente pendant toute l'année (Figure 50 H). On remarque que les dinoflagellés sont beaucoup plus abondants en 2003 par rapport aux autres années. Ils ont été aussi présents pendant toute l'année en 2007 et 2008 où la moyenne annuelle a été supérieure à celle de la série ( $11.254.10^3$  cellules.L<sup>-1</sup>) en plus des années 2011, 2012 et 2013 (Figure 50 I). Aucune tendance générale significative n'a été détectée dans la série des diatomées. Par contre, on a observé une tendance significative dans les populations nanoplanctoniques et des dinoflagellés ( $S = 13677219$ ,  $p\text{-value} = 0.002668 < 0.05$  et  $S = 14339370$ ,  $p\text{-value} = 0.03517 < 0.05$  respectivement).



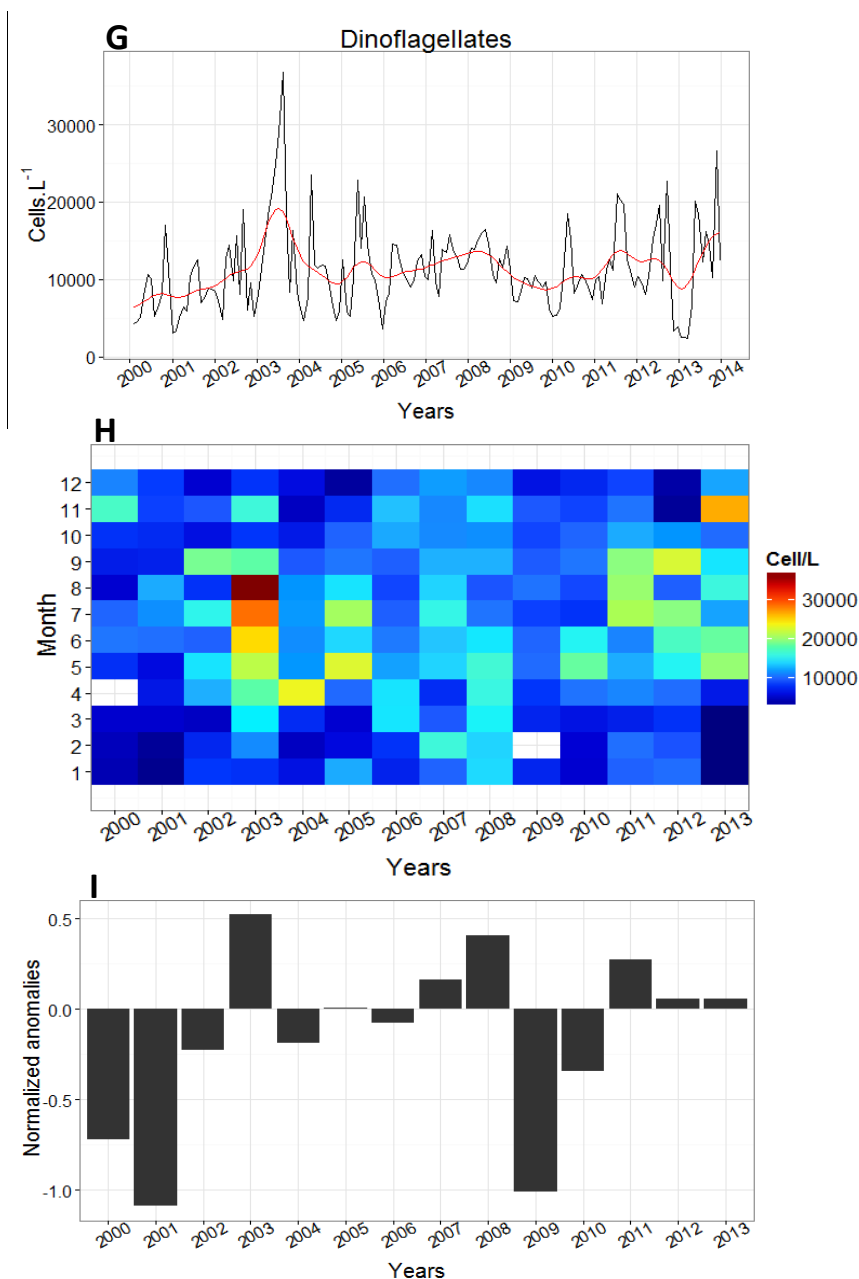


Figure 50 : Concentrations moyennes du (A) des nanoplanctons, (D) des diatomées et (G) des dinoflagellés en moyenne mensuelle (ligne noire) et moyenne annuelle mobile (ligne rouge); variabilité interannuelle et saisonnière du (B) des nanoplanctons, (E) des diatomées et (H) des dinoflagellés, les cases blanches représentent les mois sans valeurs ; déviation de la moyenne annuelle par rapport à la moyenne de la série, normalisée par l'écart-type des C) nanoplanctons, (F) diatomées et (I) dinoflagellés dans la colonne d'eau de la série temporelle au point B2 (2000-2013).

## Variabilité interannuelle de l'ensemble du zooplancton

Les abondances de l'ensemble du zooplancton fluctuent entre un minimum de  $11.7 \text{ ind.m}^{-3}$  (hiver 2011) et un maximum de  $4669 \text{ ind.m}^{-3}$  (été 2007) (Figure 51 A) ; tandis que le biovolume varie entre un minimum de  $1.32 \text{ mm}^{-3}.\text{m}^3$  (hiver 2011) et un maximum de  $925.7 \text{ mm}^{-3}.\text{m}^3$  (au printemps 2010) (Figure 51 D). Aucune tendance générale significative n'a été détectée dans les abondances et les biovolumes de l'ensemble du zooplancton de cette série.

Globalement une richesse de zooplancton est observée durant le printemps et l'été. Pendant l'année 2003 et à partir de juillet 2005 jusqu'à août 2007, une augmentation des abondances du zooplancton a été remarquée pendant toutes les saisons. Elle est élevée surtout en hiver et au début du printemps 2003, en été et en automne 2005, en hiver 2006, au printemps et au début d'été 2007 (Figure 51 B). De l'autre part, l'évolution interannuelle des biovolumes du zooplancton présente des valeurs élevées durant le printemps surtout des années entre 2006 et 2010 (Figure 51 E).

La courbe de la somme cumulée des écarts à la moyenne montre plusieurs périodes distinctes. La première période est constituée de trois années 2000, 2001 et 2002 où l'abondance diminue (Figure 51 C). Cette abondance augmente en 2003 et re-diminue en 2004. Ensuite, une période de 5 années, (entre 2005 et 2009) est caractérisée par une augmentation de cette abondance pour devenir supérieure à la moyenne de la série. Enfin, une diminution progressive est aperçue jusqu'à l'année 2013. Tandis que celle des biovolumes (Figure 51 F) montre presque les mêmes changements. Le premier changement est caractérisé par une décroissance du biovolume entre 2000 et 2005 avec une petite augmentation en 2003. Ensuite, le biovolume du zooplancton montre une augmentation à partir de 2006 jusqu'à 2010 avec des valeurs moyennes supérieures à celle de la série et décroît finalement jusqu'à 2013.

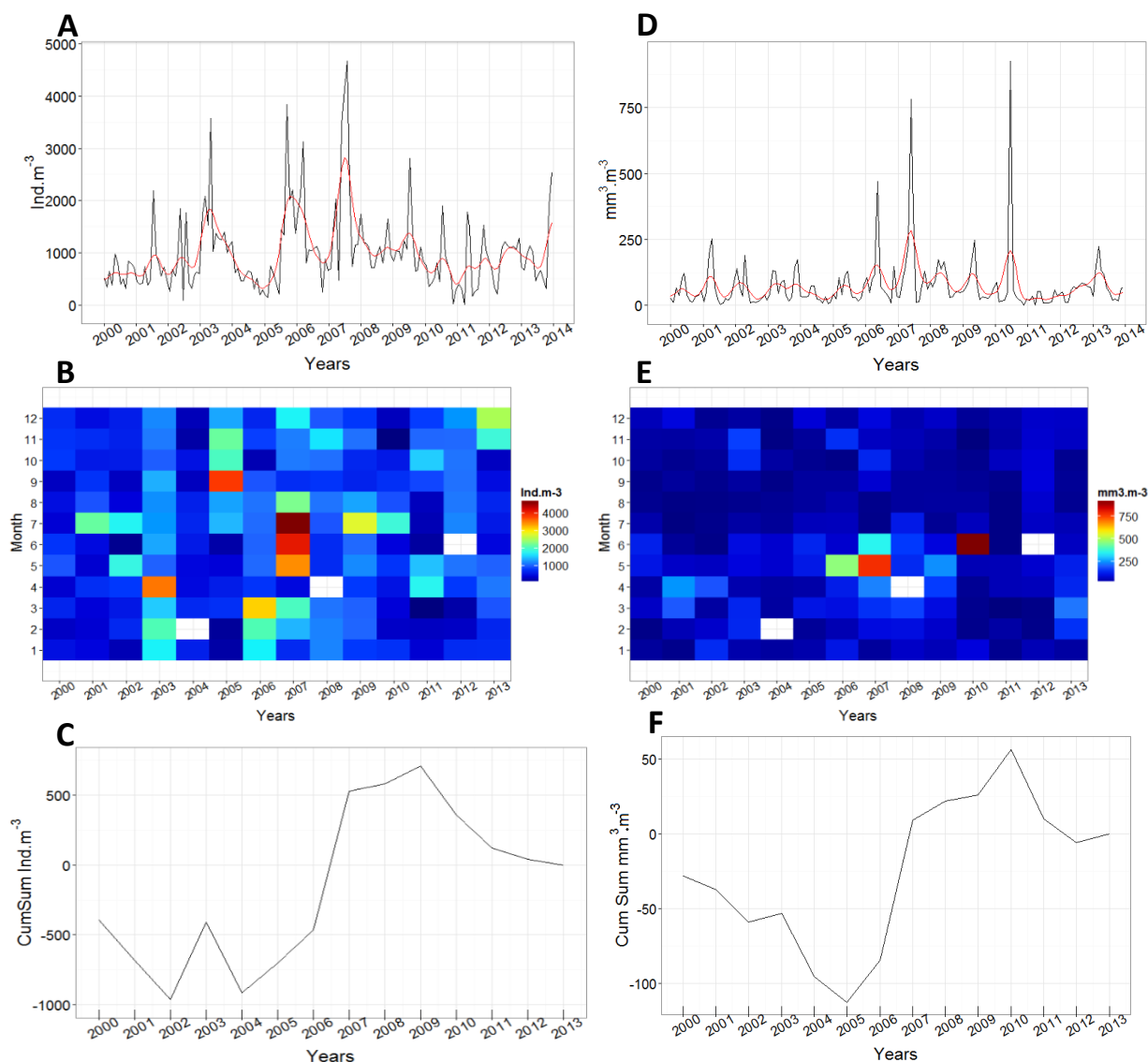


Figure 51 : Variabilité interannuelle et saisonnière et sommes cumulées des écarts à la moyenne des abondances (A, B, C) et du biovolume (D, E, F) de l'ensemble du zooplancton au point B2 (2000-2013). Les cases blanches représentent les mois sans valeurs.

### Moyenne annuelle des abondances des différents taxa

Les moyennes annuelles des abondances zooplanctoniques montrent des variations plus ou moins homogènes (Figure 52). L'année 2003 a été caractérisée par des abondances élevées, enregistrées par un grand nombre de groupe. Citons les annélides, les appendiculaires, les ostracodes, les larves euphausiacés, les siphonophores, les méduses, les larves nauplii, le gastéropode du genre *Limacina*, les annélides et les œufs divers.

L'année 2004 a montré des abondances les plus faibles parmi les autres, pour la majorité des groupes (citons les annélides, les appendiculaires, les chaetognathes, les ptéropodes, les ostracodes, les thaliacés, les méduses, les siphonophores, les copépodes, les œufs, les larves euphausiacés et les larves nauplii).

A partir de 2005, quelques groupes présentent une tendance croissante où leurs abondances deviennent élevées et atteignent le maximum en 2007 comme les appendiculaires, les chaetognathes, les thaliacés, les méduses, les siphonophores, les copépodes, les œufs, les foraminifères et les larves cirripèdes. Les ptéropodes ont montré une tendance décroissantes, tandis que l'évolution des *Evadne* spp, les ostracodes, les larves échinodermes et les larves euphausiacés ont présenté une abondance plus stable.

Les cladocères du genre *Penilia* ont été absents au début de la série et témoigne une première apparition en 2005, puis en 2009 et 2010. Il montre des abondances plus élevées en 2012 et 2013. De même, une apparition des larves des échinodermes a été signalée à partir de 2002.

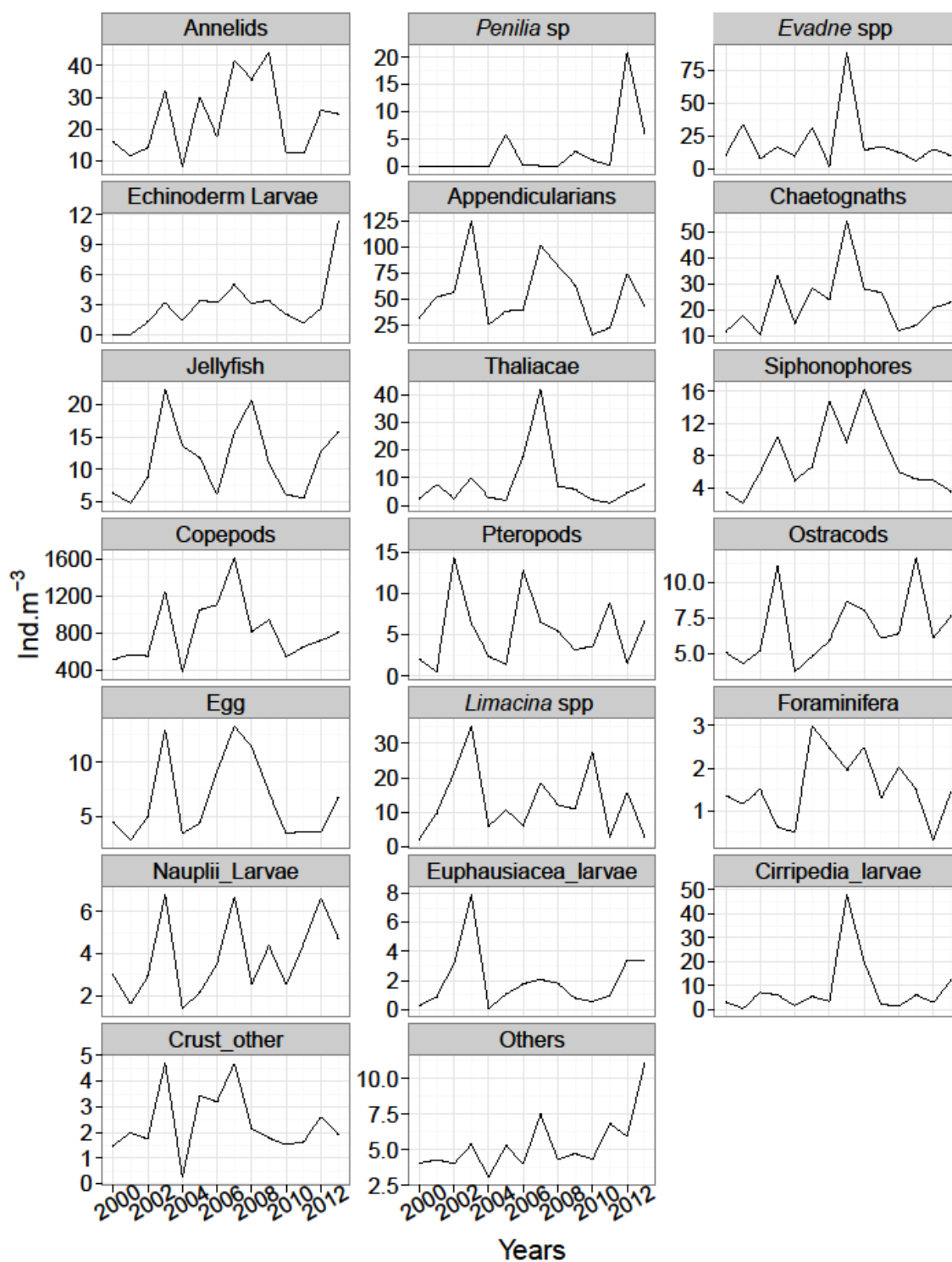


Figure 52: Moyenne annuelle de la variabilité interannuelle des abondances (ind.m<sup>-3</sup>) des différents taxa identifiés par le Zooscan au point B2 (2000-2013).



### Sommes cumulées des abondances des différents taxa

La Figure 53 met en évidence la somme cumulée des écarts à la moyenne des abondances des différents taxa identifiés au point B2 entre 2000 et 2013. Les différents genres de copépodes identifiés suivent la même évolution que celle de l'ensemble des copépodes et ne sont pas présentés par la suite dans cette figure.

On remarque que les années 2003 et de 2005 jusqu'à 2009 sont caractérisées par une augmentation des abondances moyennes pour la majorité des groupes zooplanctoniques (les annélides, les *Evadne* spp, les chaetognathes, les appendiculaires, les ptéropodes, les ostracodes, les thaliacés, les *Limacina* spp, les siphonophores, les méduses, les copépodes, les œufs et les larves des échinodermes, des cirripèdes et des euphausiacés) qui sont supérieures à celle de la série. Les larves cirripèdes montrent uniquement une augmentation dans leurs abondances entre 2006 et 2009.

On trouve pour la première période qui s'étend de 2000 à 2002, que les annélides, les chaetognathes, les larves des nauplii et des cirripèdes, les ostracodes, les méduses, les siphonophores, les copépodes, les foraminifères et les œufs subissent une décroissance, tandis que pour les appendiculaires, les genres *Limacina* et *Evadne*, cette abondance augmente.

Les genres *Evadne* présentent une certaine régularité dans leur distribution interannuelle et ils sont caractérisés par une alternance de croissance et décroissance entre chaque année. Entre 2007 et 2013, leur moyenne annuelle est supérieure à celle de la série. Le genre *Penilia* révèle une présence exclusive en 2005, 2009, 2010, 2012 et 2013.

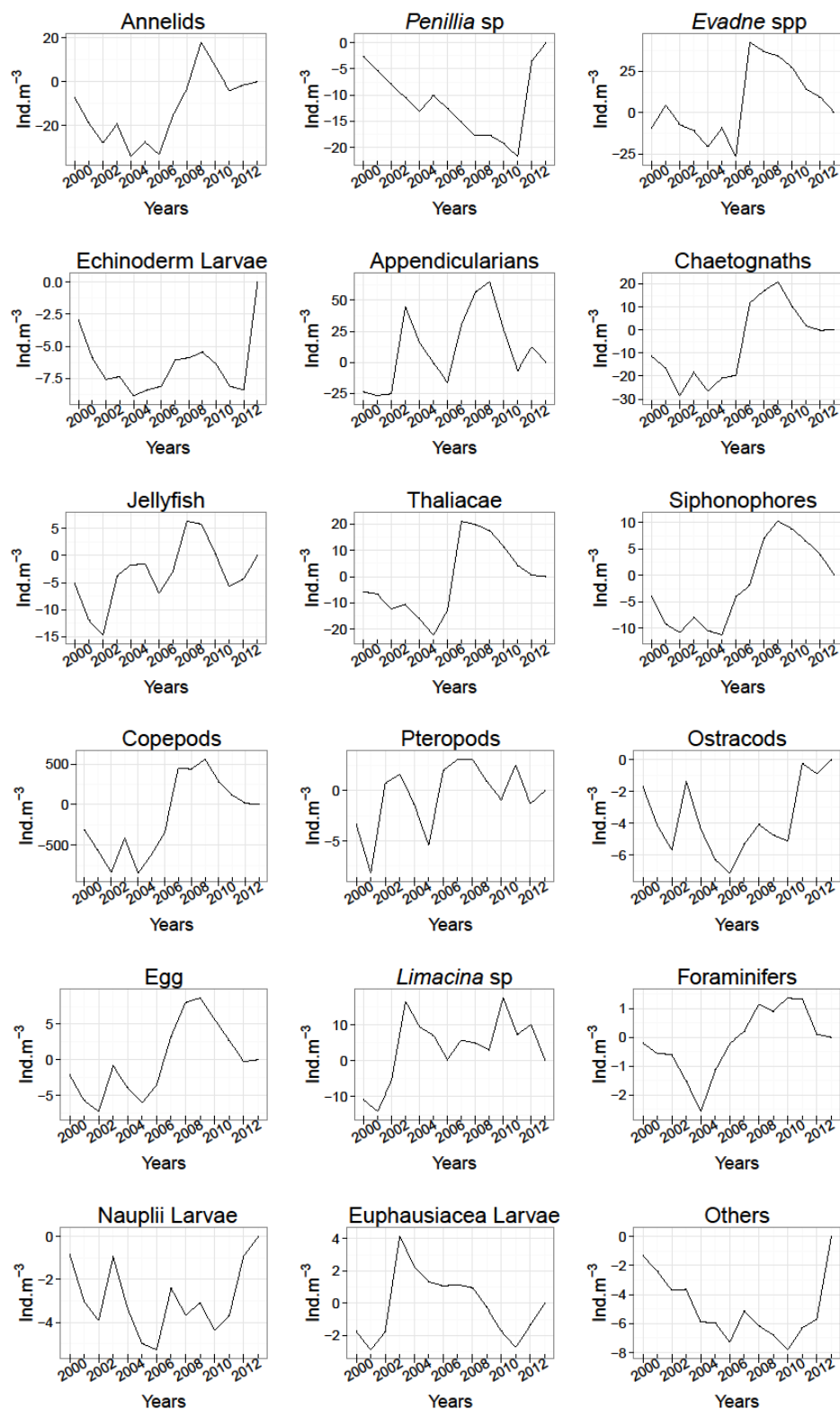


Figure 53: Sommes cumulées des écarts à la moyenne des abondances des différents taxa identifiés au point B2 (2000-2013).

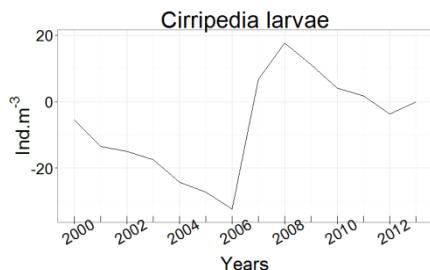


Figure 53 : Sommes cumulées des écarts à la moyenne des abondances des différents taxa identifiés au point B2 (2000-2013) (suite).

### Biomasse du zooplancton non gélatineux

Au point B2 le zooplancton non gélatineux présente une biomasse moyenne de  $0.98 \mu\text{g.C.L}^{-1}$  pour toute la série (Figure 54). On remarque que cette biomasse tend à augmenter significativement au cours des années ( $S = 625810$ ,  $p\text{-value} = 0.0353 < 0.05$ ). En 2006, 2008, 2009, 2012 et 2013, les moyennes annuelles de la biomasse ont augmenté pour atteindre  $1.1 \pm 0.67 \mu\text{g.C.L}^{-1}$ ,  $1.06 \pm 0.47 \mu\text{g.C.L}^{-1}$ ,  $1.38 \pm 1.51 \mu\text{g.C.L}^{-1}$ ,  $1.34 \pm 0.66 \mu\text{g.C.L}^{-1}$ ,  $1.59 \pm 1.01 \mu\text{g.C.L}^{-1}$ , respectivement (Figure 54 A) et les valeurs ont été supérieures à la moyenne de la série (Figure 54 B). Tandis qu'une diminution apparente a été détectée en 2004, 2010 et 2011 ( $0.61 \pm 0.37 \mu\text{g.C.L}^{-1}$ ,  $0.64 \pm 0.5 \mu\text{g.C.L}^{-1}$ ,  $0.61 \pm 0.53 \mu\text{g.C.L}^{-1}$ , respectivement) avec des valeurs moyennes inférieures à celle de la série.

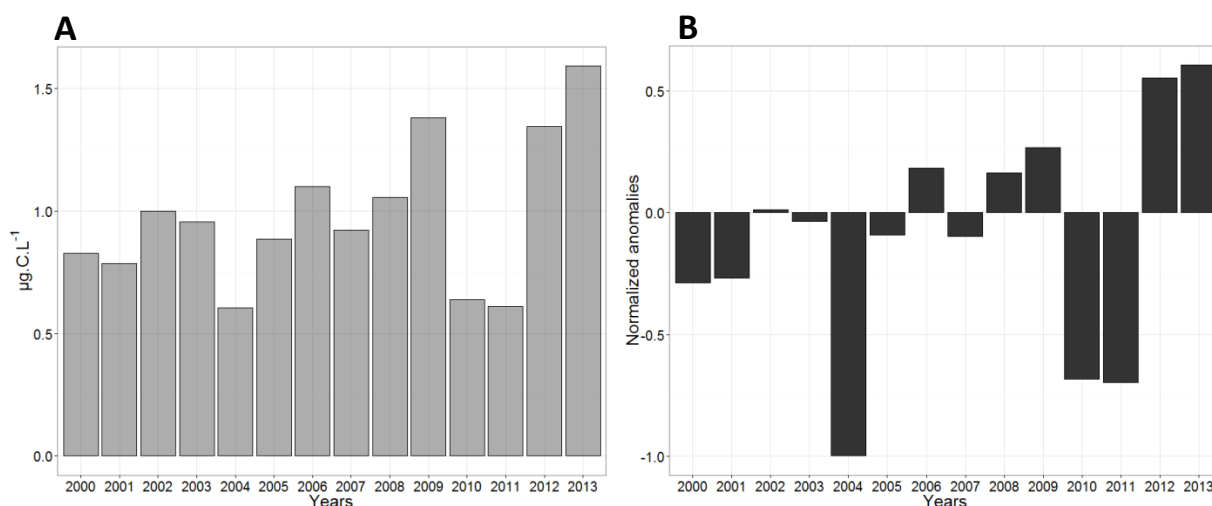


Figure 54 : Evolution temporelle de (A) la biomasse du zooplancton non gélatineux en  $\mu\text{g.C.L}^{-1}$  et (B) déviation de la moyenne annuelle par rapport à la moyenne de la série, normalisée par l'écart-type au point B2 (2000-2013).

## Discussion

Les résultats montrent que la variabilité temporelle de l'environnement et du zooplancton dans la zone côtière libanaise peut être divisée en 3 échelles de temps :

- l'évolution générale sur les 14 ans qu'on nommera évolution à long terme.
- les changements visibles sur un groupe d'année (2005-2010) qu'on nommera échelle interannuelle.
- les changements ponctuels (sur une année) qu'on nommera échelles courtes.

### Evolution à long terme

Le réchauffement climatique a été détecté dans de nombreuses parties de la terre. Dans l'océan, les températures ont augmenté de  $0.07\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$  durant la période 1901-2014 (NOAA 2015). Cette augmentation a touché les mers adjacentes incluant la mer Méditerranée. Le changement climatique modifie la structure, le fonctionnement et la diversité des écosystèmes (Beaugrand and Goberville 2010) et surtout la distribution du zooplancton ayant des préférences thermiques (Southward et al. 1995). L'augmentation des températures influence la phénologie des espèces (Edwards and Richardson 2004). Une corrélation significative a été mise en évidence entre le cycle saisonnier du zooplancton et la température (Valdes et al. 2007). En fait, les pics saisonniers de l'ensemble du zooplancton changent en fonction de la température (Greve et al. 1996 ; Edwards and Richardson 2004).

Dans les trois dernières décennies, une augmentation significativement positive de la température de surface ( $0.042\text{ }^{\circ}\text{C}.\text{yr}^{-1}$ ) a été observée dans le sub-bassin Est de la Méditerranée (Skiris et al. 2012) et (Shaltout and Omstedt 2014). Au point B2, aucune tendance significative entre 2000 et 2013 n'a été détecté au niveau des paramètres physiques (Figure 42 et Figure 43). Cependant, on a remarqué un réchauffement printanier significatif de  $0.09\text{ }^{\circ}\text{C}.\text{yr}^{-1}$  (entre avril et juin) ( $S=192$ ,  $p < 0.05$ ) de la couche de surface (Figure 6, annexe 2). Ceci confirme l'étude de Nykjaer (2009) dans la méditerranée orientale qui a noté une tendance printanière significative de  $0.05 \pm 0.009\text{ }^{\circ}\text{C}.\text{yr}^{-1}$  (entre mai et juin) au cours des deux dernières décennies. Ce

réchauffement n'a pas été accompagné par des changements notables dans la disposition des nutriments, du phytoplancton ou dans la densité du zooplancton.

Toutefois, on note que la biomasse de l'ensemble de zooplancton non gélatineux a suivi un cycle saisonnier clair ayant un pic maximal en mai (Figure 55), soit d'un mois en avance par rapport aux études précédentes de Lakkis (1982). L'auteur a trouvé un pic de biomasse en juin dans les eaux libanaises jusqu'au début des années 80. L'analyse de l'ensemble des données environnementales physiques a montré une certaine stabilité dans la phénologie des paramètres. Lakkis (1982) a montré dans ses sites de références, la succession des éléments nutritifs (nitrates et phosphates) en mois de mars et le maximum de la chlorophylle-*a* en mois de juin. Alors que, cette étude présente des cycles différents ayant un maximum d'orthophosphates au mois de juin et des nitrates au mois de février et mars. Cette distinction peut être liée aux déversements de l'usine chimique riche en produits phosphatés et de la rivière d'Al-Jaouz situés à proximité dans la région. L'hypothèse de l'impact d'un réchauffement printanier plus précoce est avancée mais l'avancement du mélange ne peut pas vraiment être testé en raison de l'absence de données hydrologiques fiables dans les études précédentes. On se pose alors la question si le changement observé est à échelle interannuelle ?

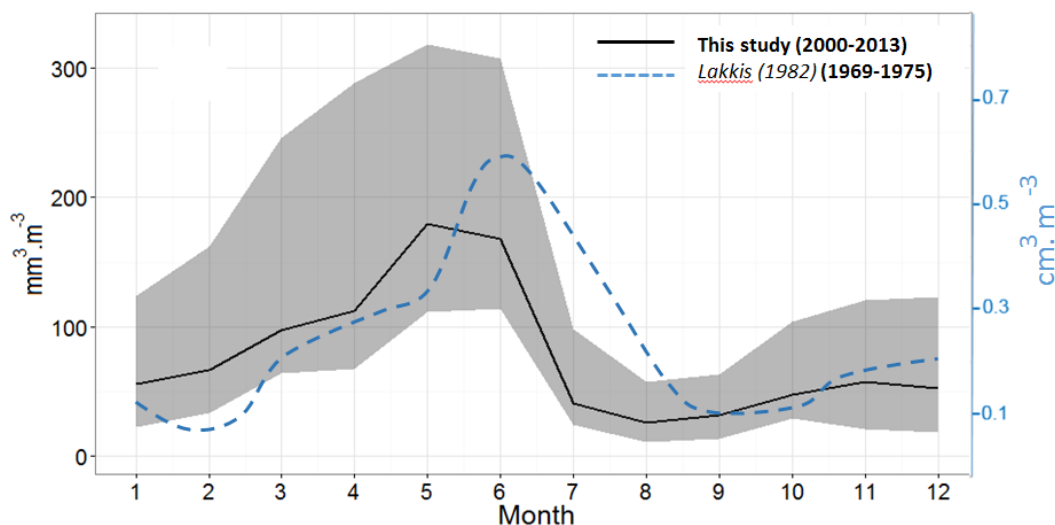


Figure 55: Comparaison entre les cycles annuels du biovolume du zooplancton non gelatineux au point B2 (2000-2013) (La ligne noire centrale représente la moyenne et les zones ombrées représentent les quartiles Q1 et Q3) et au Liban (1969-1975) selon Lakkis (1982) (la ligne pointillée en bleue).

De plus, la résolution temporelle de notre série n'est pas optimale pour détecter des changements de phénologies. Une résolution d'échantillonnage plus courte (hebdomadaire à bimensuelle) réduit la variabilité spatio-temporelle. Elle nous permet d'évaluer précisément la phénologie du zooplancton à partir des changements intra-annuelles des abondances (Edwards and Richardson 2004 ; Greve et al. 2005 ; Johnson et al. 2008 ; Conversi, Peluso and Fonda-Umani 2009), du stade de développement et de l'état reproductif (Mackas et al. 2007 ; Batten and Mackas 2009 ; Rubao et al. 2010). Romagnan et al. (2015) et Vandromme et al. (2011) ont détecté au point B plusieurs pics d'abondances printaniers successifs chez les copépodes avec une fréquence d'échantillonnage hebdomadaire. Pourtant, la continuité avec une telle fréquence nécessite un certain engagement et des efforts par les scientifiques et les institutions locales (Mackas et al. 2012).

Concernant les cladocères, on remarque que le genre *Penilia* a été absent au début de la série et n'apparaît qu'à partir de 2005, puis en 2007-2008 et en 2012-2013 en grand nombre (Figure 52). Alors que selon (Lakkis 1982), ce genre était tout à fait absent et non signalé auparavant dans les eaux libanaises. Plus récemment, des études ont signalé l'extension et la distribution de ce genre dans plusieurs régions du monde que soit en Méditerranée (Mer Adriatique) ou ailleurs (mer d'Arabie/Oman, mer Nord, mer Noire et Nord-Est de l'Atlantique) (Johns et al. 2005 ; Piontkovski et al. 2012). Une colonisation récente de ce genre invasif a été observée et expliquée par le réchauffement des couches de surface durant la dernière décennie. On se pose la question sur les conséquences écologiques et le risque de cette invasion sur le zooplancton et sur les différents maillons de la chaîne trophique dans le milieu.

Le changement climatique et la biodiversité jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement des écosystèmes marins et contribuent significativement à la valeur économique des services écosystémiques (Amara 2010), par exemple la ressource des poissons. Les variations au niveau du zooplancton altèrent sans doute le fonctionnement des écosystèmes à échelle plus grande et les services rendus. L'hypothèse de "match-mismatch" démontre la variabilité interannuelle du recrutement des poissons causée par le timing des pics annuels des abondances des larves de poissons et des pics saisonniers du plancton (Fortier et al. 1995 ; Durant et al. 2007). Bien que la reproduction des poissons soit relativement stable et régulière, la grande variabilité interannuelle du plancton affecte profondément leur croissance. Un

chevauchement entre les pics saisonniers de la demande et celle de la disponibilité des nourritures "timing match" aboutit à une croissance optimale de poissons. Au contraire, de faible source alimentaire lors d'une demande élevée de nourriture "timing mismatch" aboutit à une faible croissance de poisson et un recrutement minime du stock. Toutes les observations basées sur cette hypothèse ont été développées dans des régions tempérées (Durant et al. 2007). Au Liban, la situation est un peu différente vu l'insuffisance des travaux fournis sur les larves de poisson. En général, on a remarqué que la densité des œufs de poissons est maximale en hiver et au début du printemps (mars et avril) et quasi-nulle à la fin d'été et au début d'automne (septembre-octobre) (Figure 33). Cette densité a été décalée d'un mois en avance de ce que Lakkis (1982) a signalé dans les eaux néritiques libanaises entre les années 1969 et 1975. Un travail ultérieur fournira une base de discussion aux zones où on s'intéressait à la structure et la dynamique des poissons.

L'ensemble des résultats à cette échelle de temps montre donc des faibles changements significatifs de la température. Il semble que certains groupes de zooplancton varient en concordance et pourraient nous alerter sur des changements accentués. On peut alors se poser la question sur l'impact écologique à long terme dans le bassin Levantin.

## **Evolution interannuelle**

Dans cette section on explique l'augmentation des abondances et des biovolumes de l'ensemble de zooplancton détectée entre 2005 et 2010 et on essaie de lier cette variabilité au changement de l'hydrologie à plus grande échelle dans le bassin Levantin. Cette partie est le sujet de l'article (Ouba et al. submitted) (voir article dans annexe 2). On en fait un résumé ici.

A partir de 2005, la salinité a augmenté de 0.3 dans la colonne d'eau au point B2 (Figure 3 annexe 2). Ce changement a reflété clairement la présence d'un phénomène similaire à l'EMT des années 90s. Ce dernier a été caractérisé par l'augmentation de la salinité dans les couches de surface et par l'enrichissement de la colonne d'eau en éléments nutritifs (Klein *et al.*, 1999). Il est dû à une alternation entre la mer Adriatique et la mer Egée comme étant deux sources de masses d'eau profonde du bassin Levantin (Leslie *et al.*, 2001 ; Malanotte-Rizzoli *et al.*, 1999 ; 2003 ; Millot, 2005 ; Roether *et al.*, 2007 ; 1996 ; Schröder *et al.*, 2006 ; Bergamasco &

Malanotte-Rizzoli, 2010 ; Schroeder *et al.*, 2010). Une telle augmentation a été également signalée en 2005-2006 par Velaoras *et al.* (2014) dans les couches intermédiaires et profondes de la mer de la Crète et par Krokos *et al.* (2014) et Kress *et al.* (2014) dans les couches intermédiaires et de surface de la partie est du Levantin. La période 2005- 2010 a été définie comme étant un EMT-like (Krokos *et al.* 2014) due seulement à un mécanisme interne qui se répète d'une manière plus ou moins régulière chaque dix ans (Theocharis *et al.* 2014). Par conséquent, une formation d'une nouvelle masse d'eau égeenne, moins dense que celle des années 90, à peine a pu remplacer les couches d'eaux profondes (EMDW) du bassin Levantin existante (Krokos *et al.* 2014 ; Theocharis *et al.* 2014 ; Velaoras *et al.* 2014).

Durant cette période, on a observé que la colonne d'eau était plus homogène pendant les hivers et moins stratifiée pendant les étés (Figure 4, annexe 2) ce qui a favorisé la disponibilité des éléments nutritifs provenant des couches profondes (Klein *et al.* 1999). Les concentrations de ces éléments mesurées dans les dix premières mètres (données non présentées) ont été supérieures aux valeurs moyennes signalées dans le bassin Levantin oligotrophe (Krom *et al.* 1991). Ils ont éventuellement masqué les concentrations réelles résultantes de la convection de la colonne d'eau durant la période EMT-like. Cependant, ce point a été démontré qu'il est affecté par les apports anthropiques continentaux (Abboud-Abi Saab *et al.* 2010 ; cette étude). Alors, les données des éléments nutritifs ne pourront pas être utilisées dans ce travail, pour renforcer les autres observations basées sur l'enrichissement de la colonne d'eau en sels nutritifs.

Concernant le phytoplancton, une augmentation significative des abondances des populations nano. et microphytoplanctoniques a été observée durant les hivers et le début des printemps de la période de l'EMT-like avec un pic précoce d'un mois dans la zone d'étude (Figure 5, annexe 2). Cette augmentation explique probablement la disponibilité des éléments nutritifs dans la colonne d'eau résultante des changements des caractéristiques physiques de la colonne d'eau durant la période saline. Les résultats trouvés ont été partiellement contradictoires avec les observations de Kress *et al.* (2014) en Israël qui ont noté une augmentation de la biomasse de la chlorophylle-*a* maximale entre 2005 et 2010. De même, les auteurs ont proposé une hypothèse basée sur la remonté de la nutricline considérée comme une source essentielle pour le développement du phytoplancton de la couche euphotique. Par contre, on a remarqué une augmentation significative ( $W = 4276$ ,  $p < 0.05$ ) des abondances de l'ensemble du zooplancton



de 45% (de  $840 \pm 578 \text{ ind.m}^{-3}$  jusqu'à  $1212 \pm 918 \text{ ind.m}^{-3}$ ) (Tableau 1, annexe 2). Cette différence a été observée chez les copépodes incluant le genre des *Calanus*, des *Acartia*, des *Corycaeus* et des *Oithona*, les ptéropodes, les gastéropodes, les siphonophores, les chaetognathes, les annélides et les œufs.

L'abondance des herbivores et des filtreurs a augmenté d'un facteur de 1.4 (de  $96.5 \pm 69.8 \text{ ind.m}^{-3}$  jusqu'à  $136.4 \pm 119.1 \text{ ind.m}^{-3}$ ) ; tandis que celle des carnivores (représentés par les siphonophores, les annélides et les chaetognathes) a augmenté d'un facteur de 1.6 ( $75.1 \pm 59 \text{ ind.m}^{-3}$  jusqu'à  $124.9 \pm 107.1 \text{ ind.m}^{-3}$ ) indiquant l'occurrence d'une activité alimentaire intense au point B2. Nos résultats suggèrent un développement de la communauté de zooplancton favorisée par la production phytoplanctonique précoce. Le zooplancton a probablement montré la préférence d'un régime basé sur les proies nanoplanktonic. Par conséquent, la floraison précoce de nanoplankton a permis le développement rapide des communautés de zooplancton en raison de la plasticité dans leur comportement alimentaire (Mazzocchi et al. 2003). Le développement du zooplancton suite à une production primaire et au broutage zooplanctonique a été proposé par Mazzocchi et al. (2003) dans la mer Ionienne et par Garcia-Comas et al. (2011) dans la Méditerranée occidentale. En plus, l'addition d'un excès de phosphate à un milieu oligotrophe favorise une production bactérienne et une augmentation du microzooplancton amplifiant le broutage du phytoplancton (Pitta et al. 2005 ; Psarra et al. 2005 ; Thingstad et al. 2005).

Une augmentation du zooplancton, surtout des copépodes, a été signalée dans d'autres régions méditerranéennes dans des conditions similaires. Les genres *Oithona* et *Corycaeus* ainsi que les chaetognathes ont été plus abondants dans la mer Egée (Mazzocchi et al. 2003). Une corrélation positive entre l'augmentation des copépodes et celle de la salinité a été remarquée par Christou (1998) dans la mer Egée et Conversi et al. (2009) au Golfe de Trieste au début des années 90. Les auteurs ont associé ces abondances à l'augmentation de la salinité et au changement de la circulation des masses d'eaux au cours de l'EMT.

## Evolution à court terme

Malgré que le point B2 appartienne aux eaux du large, on a démontré qu'il est affecté occasionnellement par les effluents côtiers (voir chapitre 3) qui pourraient par la suite entraîner

des variations de la densité du plancton d'une année à une autre. Telles variations peuvent aller du simple au complexe. Dans cette partie, on essaie d'expliquer que l'année 2003 correspond à des abondances zooplanctoniques élevées et l'année 2010 aux abondances les plus faibles de la série, que ce soit par les apports anthropiques continentaux riches en éléments nutritifs ou le forçage climatique.

Si on examine l'abondance du zooplancton en 2003, on remarque que la valeur moyenne correspondante ( $1551.4 \text{ ind.m}^{-3}$ ) est supérieure à celle de la moyenne de la série (Figure 56). On note que, durant cette année, le point B2 est riche en nitrates et nitrites, ainsi que des fortes concentrations de la chlorophylle-*a* et des dinoflagellés ont été présentes dans le milieu. Les fortes crues des rivières durant les saisons humides, surtout la rivière d'Al-Jaouz, charriant les éléments nutritifs ont enrichi la zone côtière jusqu'au point B2, ont provoqué un bloom plus intense (Figure 57) et ont causé le développement zooplanctonique observé. Notre résultat se concorde avec l'étude de Fakhri et al. (2005) au point B2 qui présente une dynamique très voisine caractérisée par un pic particulier de nitrates et nitrites en hiver et début du printemps de l'année 2003.

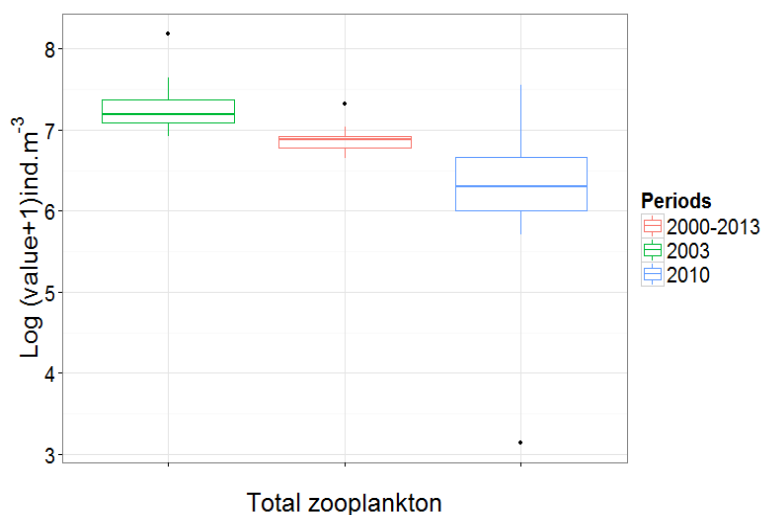


Figure 56 : Boîte à moustache représentant la comparaison des abondances zooplanctoniques entre l'année 2003, 2010 et la série temporelle au point B2 (2000-2013).

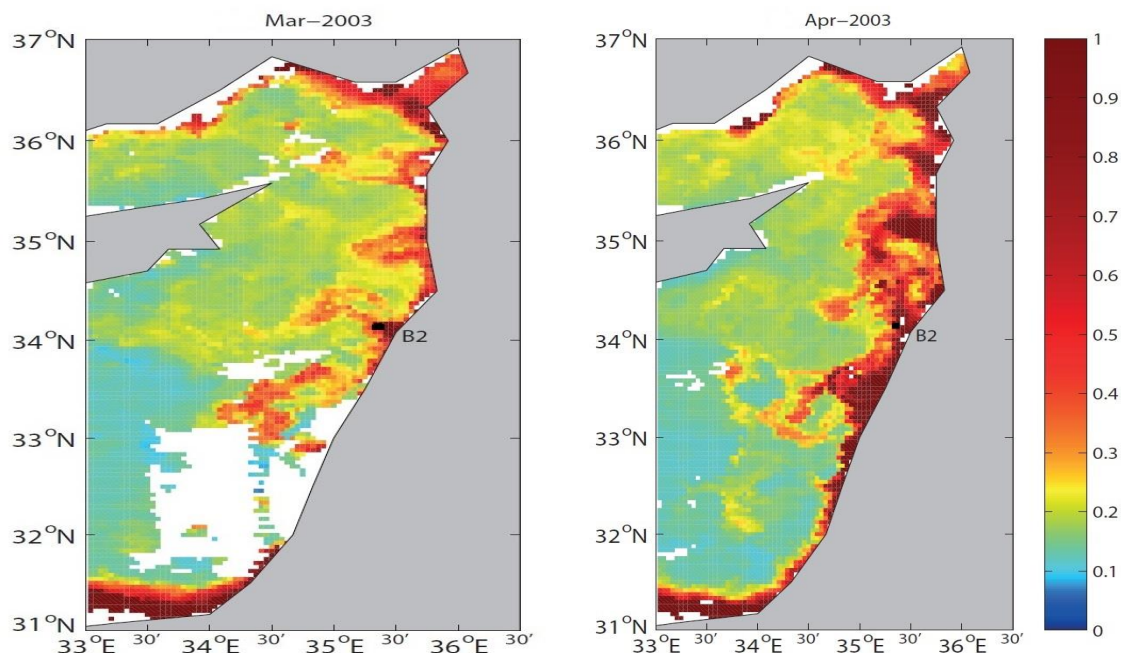


Figure 57 : Carte représentant la distribution spatiale de la chlorophylle-a ( $\text{mg.m}^{-3}$ ) en 2003 issue de l'analyse d'images satellitaires MODIS au niveau du bassin Levantin.

Les populations picophytoplanctoniques, non détectées et non comptées sous le microscope, peuvent aussi contribuer significativement à l'augmentation de ces concentrations chlorophylliennes dans la zone d'étude. Elles dominent la biomasse totale du plancton marin et jouent un rôle majeur dans la production primaire dans la Méditerranée (Calbet 2008; Magazzù and Decembrini 1995) et surtout dans le bassin oriental oligotrophe (Thingstad and Rassoulzadegan 1999 ; Turley and Stutt 2000 ; Uitz et al. 2012). Durant cette année (2003), l'abondance du zooplancton herbivore (les appendiculaires, les ptéropodes, les copépodes et les ostracodes) a augmenté au point B2. Ceci peut être dû au changement quantitatif et qualitatif potentiel de la source alimentaire phytoplanctonique (Garcia-Comas 2009). Les herbivores ont été aussi accompagnés par les organismes carnivores (les annélides, les siphonophores, les chaetognathes, les thaliacés et les copépodes) et les larves (euphausiacés, cirripèdes et nauplii) en respectant le timing des pics maximaux. Les populations phytoplanctoniques, incluant le picophytoplancton, ont été potentiellement les premiers organismes à refléter la présence de cette quantité élevée d'élément nutritif dans la colonne d'eau. Une variation dans la composition phytoplanctonique altère significativement la croissance du zooplancton et surtout des copépodes (Hirst and Lampitt 1998).

En revanche, l'année 2010 a été caractérisée par une abondance moyenne assez faible ( $649.3 \text{ ind.m}^{-3}$ ) du zooplancton au point B2 (Figure 56). On remarque que, durant cette année, on a une augmentation de la vitesse du vent, une diminution de la stabilité de la colonne d'eau, ainsi qu'une diminution de la chlorophylle-*a* et des populations phytoplanctoniques. Cet affaiblissement a été détecté également au niveau de tout le bassin (Figure 58). Il pourrait être expliqué par la présence des épisodes de vent du Sud Sud-Ouest fréquent y induisant un mélange vertical de la colonne d'eau et une instabilité dans le milieu ; ces conditions mitigent le développement des populations phytoplanctoniques surtout durant le bloom printanier. Par conséquent, on pourrait émettre une hypothèse sur la diminution des abondances du zooplancton résultant de la faible production primaire.

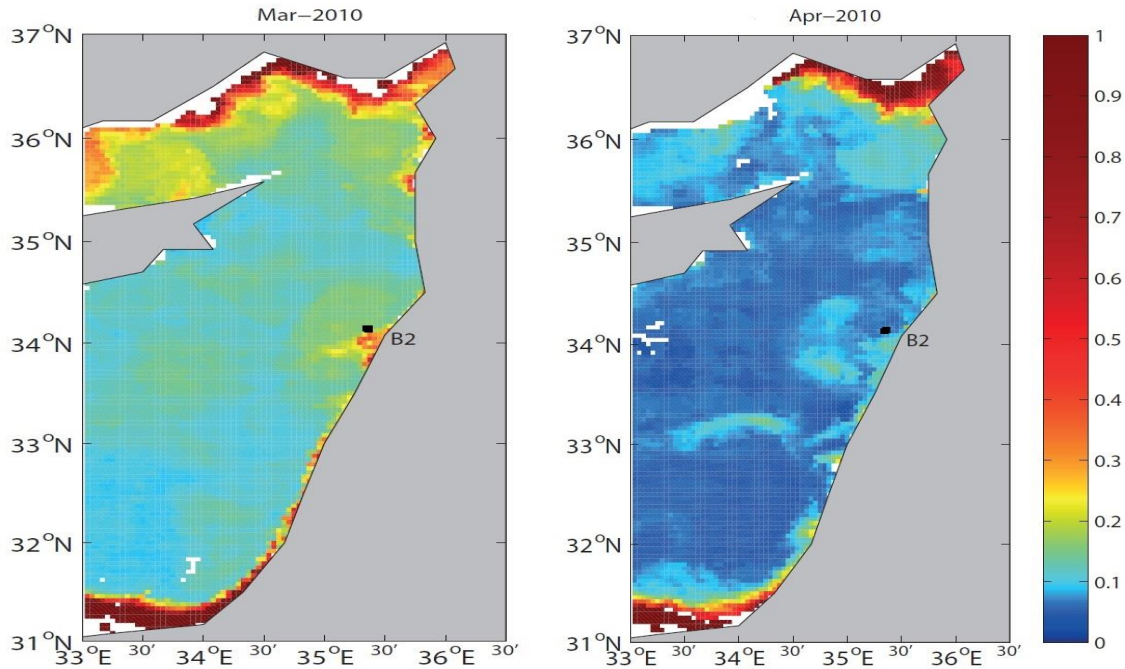


Figure 58 : Carte représentant la distribution spatiale de la chlorophylle-*a* ( $\text{mg.m}^{-3}$ ) en 2010 issue de l'analyse d'images satellitaires MODIS au niveau du bassin Levantin.

## Conclusion

L'étude de la variabilité temporelle des paramètres environnementaux à la station B2 nous a permis de clarifier l'évolution du zooplancton conditionnée selon trois échelles :

- A long terme (14 ans), le zooplancton et les paramètres environnementaux ont montré une certaine stabilité et aucune variation accentuée n'a été notée. Cependant, le réchauffement printanier signalé dans la couche de surface aurait probablement influencé le décalage observé du pic annuel de la biomasse du zooplancton par rapport aux études précédentes. Ceci nous pousse à étudier plus spécifiquement certains groupes et/ou genres de zooplancton ayant une certaine exigence thermique afin d'expliquer les futurs changements. En plus, une détection pour la première fois en 2005 des cladocères du genre *Penilia* a été observée. Cette arrivée dans le bassin Levantin évoque une question sur les conséquences écologiques à long terme.
- A échelle interannuelle, la salinité a augmenté dans la colonne d'eau à partir de 2005 suite au déclenchement de l'EMT-like. En même temps, les abondances et les biovolumes du zooplancton ont presque doublé jusqu'à 2010, à la fin de l'EMT-like. Par contre, les concentrations phytoplanctoniques ont diminué simultanément. D'après ces résultats, un contrôle de type "top down" du zooplancton sur le phytoplancton peut être évoqué. Par ailleurs, une autre hypothèse pourra être valable concernant le transport des nouvelles populations zooplanctoniques vers la région par les masses d'eaux récemment formées dans la région. Pourtant, des études plus approfondies (par exemple des analyses au niveau des espèces) pourront être utiles pour caractériser cette approche.
- A une échelle plus courte, le zooplancton au point B2 semble être conditionné plutôt par des apports probables de nutriments par la rivière d'Al-Jaouz que par l'activité de l'usine chimique de Selaata. La disponibilité des sels nutritifs est indispensable pour un développement phyto harmonieux. Etant donné que le milieu étudié est continuellement enrichi par les orthophosphates, un apport excessif en eau douce riche en nitrates entraîne une production primaire élevée, ce qui est le cas de 2003. Le forçage climatique lié au vent peut jouer également un rôle essentiel dans cette variation ; des conditions extrêmes persistantes dans la région affectent négativement le développement zooplanctonique (le

cas de l'année 2010). Des mesures ultérieures doivent prendre en considération le coefficient de mélange vertical qui joue un rôle dans la diffusion des éléments nutritifs vers les couches de surface.

Il faut avouer que l'étude de l'écologie du zooplancton au point B2 est plus complexe et sa compréhension nécessite des études à plus long terme, d'où la nécessité de continuer l'échantillonnage pour avoir une série plus longue. Le rythme de l'échantillonnage doit être encore plus serré et un pas plus petit pourra être plus utile pour cerner les variations intra-annuelles du zooplancton et mettre en évidence la phénologie correspondante. L'étude en un point fixe a l'inconvénient de ne pas prendre en compte la dimension spatiale des évolutions hydrologiques et biologiques et rend parfois les interprétations difficiles.

## **Chapitre 5 : Etudes des spectres de taille du zooplancton total au point B2**

### **Introduction**

La taille des organismes planctoniques est une des variables considérée comme étant un bon indicateur de l'état écologique de l'écosystème pélagique (Stemmann and Boss 2012 ; Trudnowska et al. 2014 ; Vandromme et al. 2014) ainsi qu'un indice de la propagation de l'énergie des producteurs primaires jusqu'aux grands prédateurs marins constituant les échelons supérieurs de la chaîne trophique (Heckmann et al. 2012). Les récentes études se reposent sur le classement de ces organismes, regroupant de diverses espèces, sous la forme de spectres de taille. L'objectif de ce chapitre est d'évaluer si un indicateur conventionnel basé sur le spectre de taille peut être utilisé pour mettre en évidence les changements saisonniers et interannuels que nous avons présentés dans les chapitres précédents. Si cela était le cas, un tel indicateur, obtenu rapidement, pourrait être utilisé pour assurer un suivi homogène et plus automatisé et des eaux côtières libanaises. La définition de tels indicateurs est à l'étude sur les côtes européennes dans le cadre de l'application de la Directive Cadre Stratégique du Milieu Marin (Romagnan et al. submitted).

Dans ce chapitre, on propose une analyse de la structure en taille de la communauté zooplanctonique mesurées automatiquement par le système d'imagerie le Zooscan. Cette nouvelle approche, basée sur les spectres de taille NB-SS, nous permet de décrire et d'obtenir des informations pertinentes sur l'évolution et la dynamique de la structure de taille de la communauté du zooplancton au point B2. La construction des spectres de taille NB-SS à partir des données brutes non régularisées a été utilisée. L'analyse des spectres de taille a été effectuée par des méthodes conventionnelles des NB-SS et aussi par la méthode de groupements hiérarchiques qui s'attachent à décrire le spectre brut et le spectre cumulé des fréquences relatives. Ce dernier est moins sensible aux variations d'abondances que le premier et donc permet de mieux discriminer les formes.

## Résultats

### Ensemble des spectres de taille NB-SS

Les spectres NB-SS de la série temporelle du zooplancton total, présentés dans la Figure 59, montrent une faible diversité des formes. Les profils de tous les spectres sont plus ou moins identiques avec un seul pic maximal souvent à la même gamme de classe de taille. Ils se caractérisent par une diminution rapide des abondances quand les spectres tendent vers les grandes classes de taille.

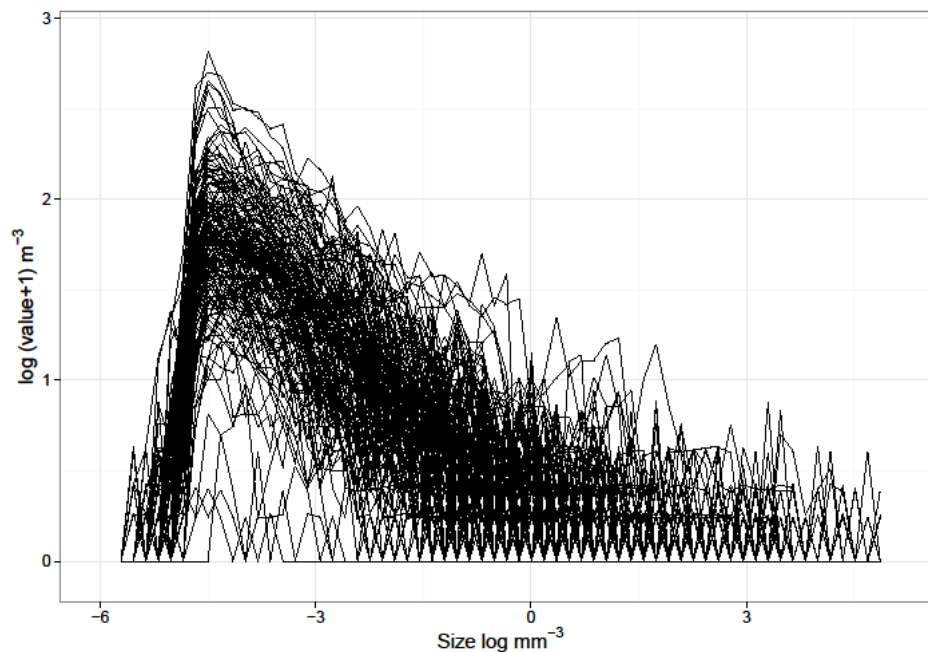


Figure 59 : Représentation de 163 spectres NB-SS de zooplancton total au point B2 (2000-2013)

### Analyse en dendrogramme des spectres d'abondances

L'analyse en dendrogrammes, réalisée sur les spectres NB-SS en valeurs absolues des données brutes de la série zooplanctonique (Figure 60), a été réalisée pour les classer selon leurs intensités. En utilisant la distance euclidienne entre les classes de taille de chaque spectre, le dendrogramme résultant a été coupé à une distance de 2000. Il indique la présence de 4 groupes majeurs d'échantillons ayant les mêmes similarités.



On remarque que les groupes diffèrent principalement par l'intensité des spectres correspondants (Figure 61 A) donc les abondances totales des organismes zooplanctoniques (Figure 61 B). Le groupe 1 est composé essentiellement des spectres de taille les moins intenses et correspond aux faibles abondances de zooplancton. Le groupe 4 est constitué des spectres de taille les plus intenses et correspond aux abondances les plus élevées. Les groupes 2 et 3 occupent les places intermédiaires. La variabilité interannuelle est marquée dans cette série. Durant les années 2003 et entre 2006-2010 (période EMT), une chute des abondances du zooplancton appartenant au groupe 1 a été observée ainsi qu'une apparition de ceux appartenant aux groupes 3 et 4.

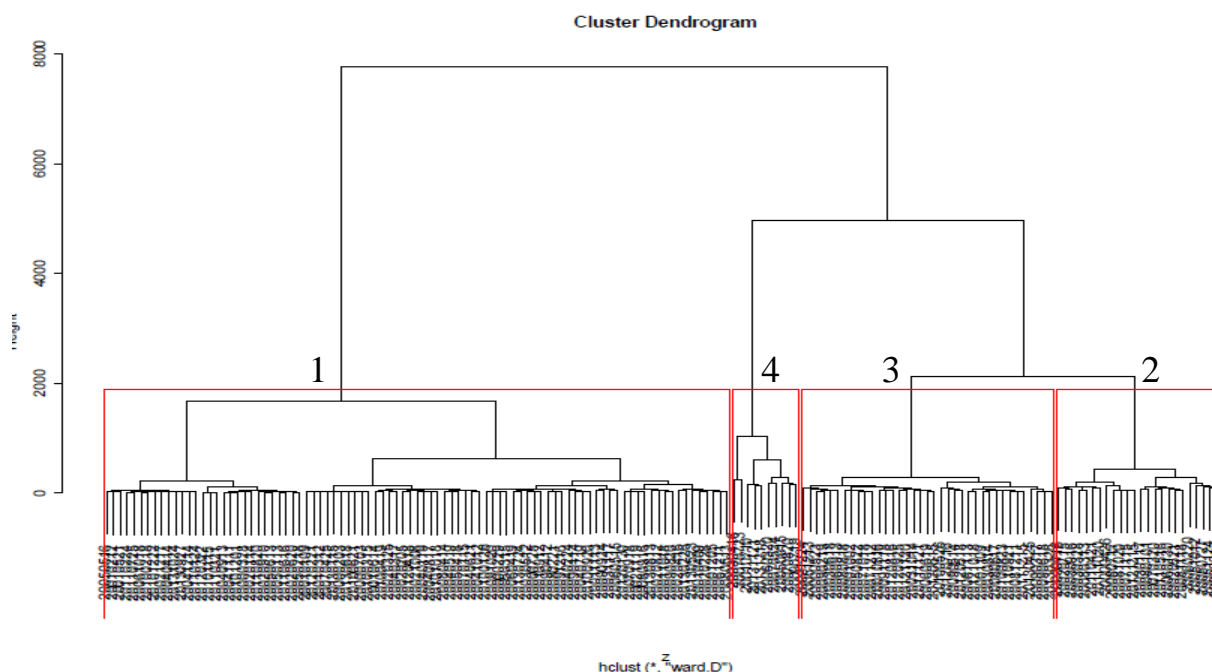


Figure 60 : L'analyse en dendrogramme des spectres de tailles NB-SS bruts du zooplancton total au point B2 en utilisant la distance euclidienne entre les classes de taille de chaque spectre. La distance coupée au niveau de 2000 présente 4 groupes majeurs.

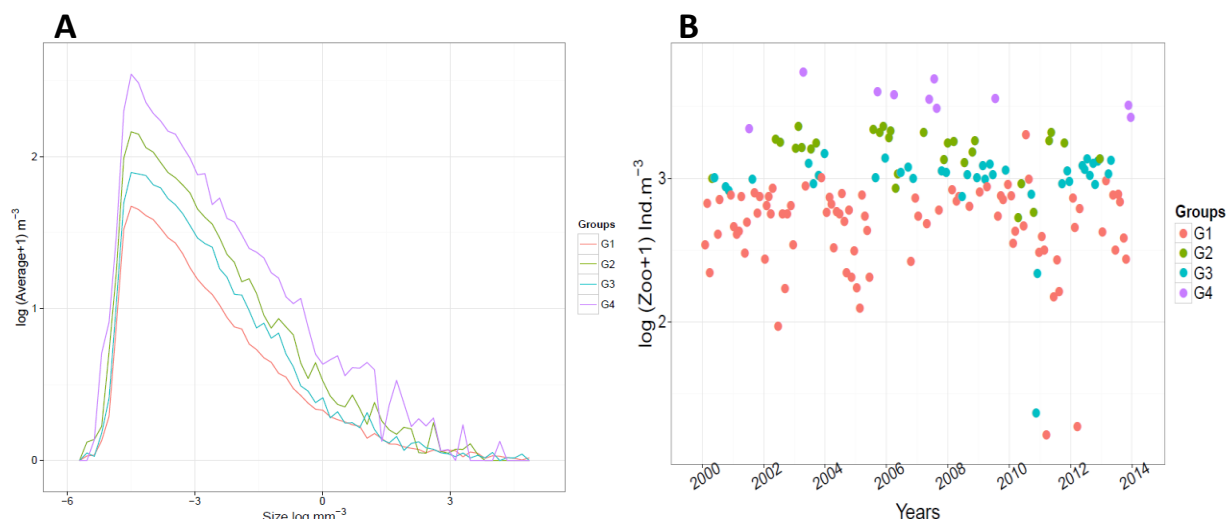


Figure 61 : (A) Moyenne des spectres de taille des groupes, (B) Evolution de l'ensemble du zooplancton selon les groupes issus du dendrogramme sur les spectres de taille en valeurs absolues au point B2 (2000-2013).

### Série temporelle de la pente des spectres de taille du zooplancton total

La pente des spectres de taille a été estimée à partir d'une régression linéaire tracée sur la partie logarithmique (voir chapitre Matériels et méthodes). Vu que toutes les valeurs calculées des pentes sont négatives, elles sont lues en valeurs absolues.

L'évolution de la pente des spectres de taille du zooplancton total ainsi que la distribution selon les groupes est mise en évidence dans la figure 4 au point B2 de l'année 2000 jusqu'à 2013. Les pentes du groupe G1 qui possèdent les valeurs absolues les plus faibles (Figure 62 A), composent les spectres de taille les moins intenses (les plus petits) (Figure 62 B). Au contraire, les pentes correspondantes au groupe G4 présentant les valeurs les plus faibles, forment les spectres de taille de grandes intensités (les plus grands). Les pentes, correspondantes aux groupes G2 et G3, ont des valeurs intermédiaires entre le premier et le dernier.

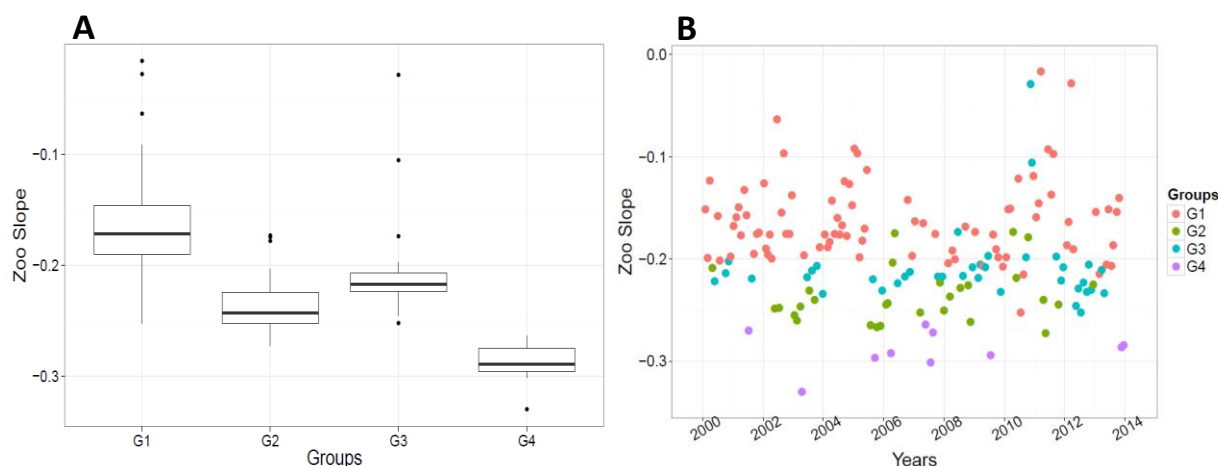


Figure 62 : (A) Boîte à moustache représentant la pente en fonction des groupes issues de l'analyse en dendrogramme, (B) Evolution de la pente des spectres de taille en valeurs absolues de l'ensemble du zooplancton au point B2 (200-2013).

La relation entre les pentes des spectres et les abondances de l'ensemble du zooplancton en fonction des groupes est de type logarithmique (Figure 63). Elle s'explique par une forte corrélation entre les variables. On observe une augmentation de la taille du zooplancton avec l'augmentation des abondances dans les échantillons. Le nombre des individus de petites tailles (pentes de valeurs absolues faibles) augmente dans les périodes de faibles abondances zooplanctoniques. Par contre, les organismes de grandes tailles (pentes de valeurs absolues élevées) sont plus fréquents dans les échantillons à fortes abondances.

D'après ces résultats, on note qu'avec l'augmentation de la pente des spectres de taille (partie logarithmique est plus pentue), les individus zooplanctoniques tendent vers les grandes classes de tailles. Alors, le groupe G1 (pente à valeur absolue faible) est composé essentiellement du zooplancton de petite taille. Tandis que, le groupe G4 (pente à valeur absolue élevée) est constitué du zooplancton de grandes tailles. Les groupes G2 et G3 représentent les individus des tailles médianes.

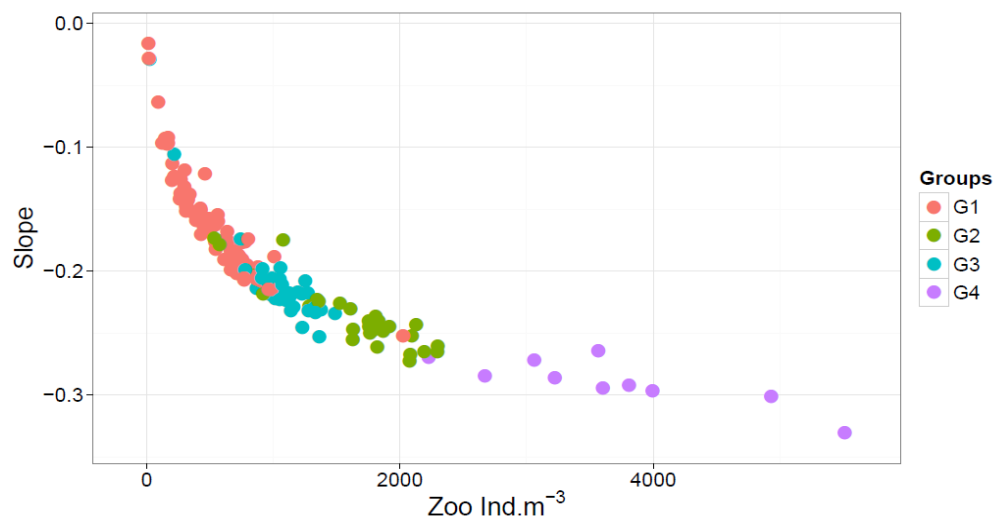


Figure 63: Relation entre la pente des spectres de taille en valeurs absolues et l'abondance du zooplancton total au point B2 (2000-2013).

On remarque dans la Figure 64 que l'interannualité des spectres est plus marquée que la saisonnalité au point B2. On a une tendance à des individus de grandes tailles du printemps jusqu'à fin d'automne avec une exception dans la période EMT entre 2006 et 2009. Les individus de tailles moyennes et grandes sont présents tout au long de cette période, même en hiver (janvier jusqu'à mars). Par contre, une tendance à des organismes de petites tailles (appartenant au groupe G1) a été détectée dans les années de faibles abondances zooplanctoniques (2001, 2002, 2004, 2010 et 2013).

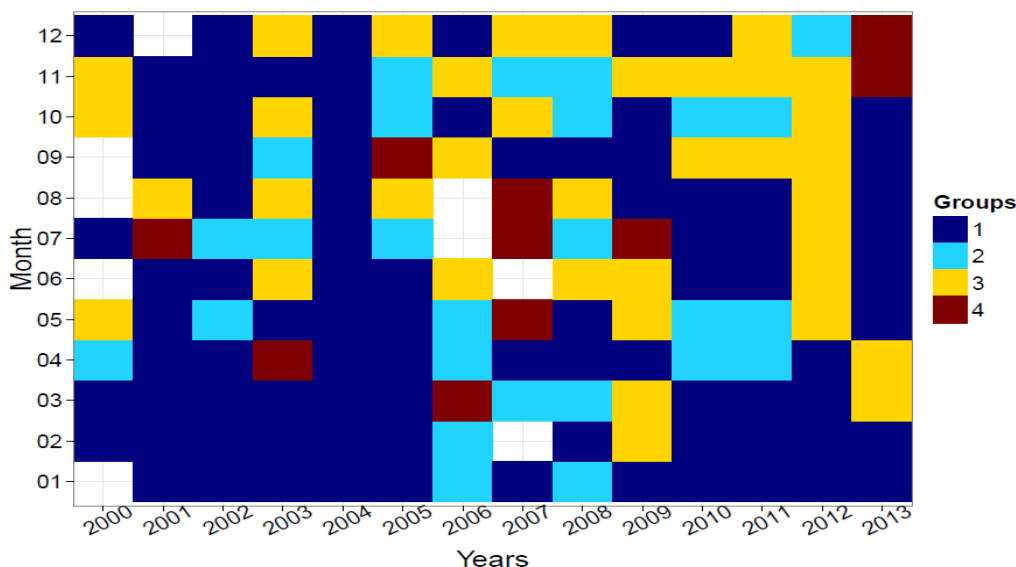


Figure 64: Variabilité interannuelle et saisonnière des quatre groupes du zooplancton total au point B2 (2000-2013). Les cases blanches représentent les mois sans valeurs.

### Analyse des spectres de taille cumulés par dendrogramme

D'après l'analyse des spectres de taille calculés sur les fréquences absolues, on a observé l'intensité et la taille de chaque groupe. Alors dans cette partie, on a analysé les spectres en fréquences relatives cumulés afin d'envisager et de classifier leurs formes. Un autre dendrogramme sur les spectres cumulés (Figure 65) a été performé en utilisant également la distance euclidienne entre les différentes classes de taille. Suite d'une coupure à une distance de 250, quatre groupes majeurs d'échantillons ont été obtenus ayant les mêmes similarités. Notons que la distribution de ces groupes diffère de ceux en valeurs absolues. Chaque groupe se caractérise par une gamme de taille différente allant des organismes de tailles les plus petites jusqu'aux tailles les plus grandes (Figure 66). Le premier groupe (G1) présente le zooplancton de petite taille. En revanche, le groupe G4 présente les individus de grandes tailles. Les groupes G2 et G3 exposent les individus de tailles intermédiaires.

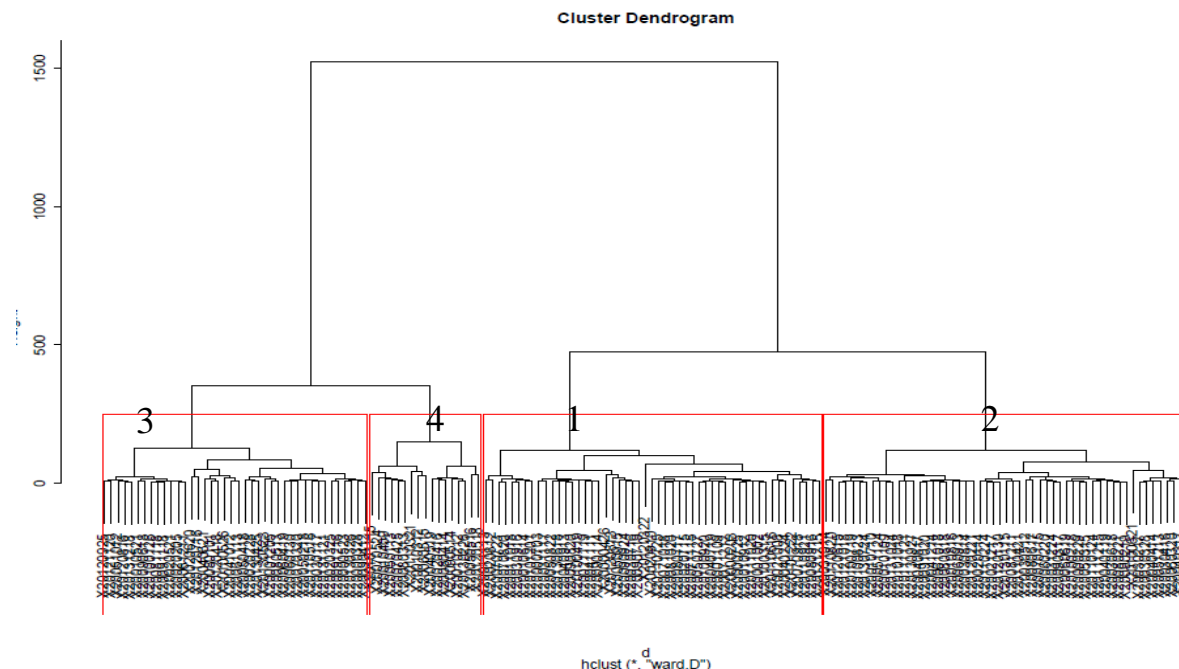


Figure 65 : Analyse en dendrogramme des spectres de tailles NB-SS cumulés du zooplancton total au point B2 en utilisant la distance euclidienne entre les classes de taille de chaque spectre. La distance coupée à 250 présente 4 groupes majeurs.

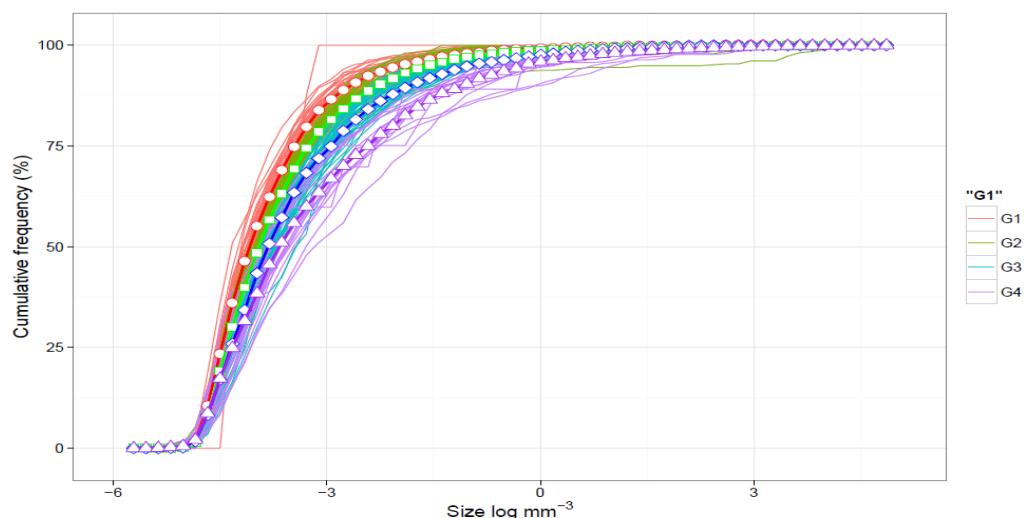


Figure 66 : Groupes majeurs constituant les spectres de tailles cumulés du zooplancton total au point B2 avec la moyenne de chaque groupe marquée en couleur plus foncée.

L'évolution des abondances du zooplancton ne montre aucune distribution régulière et claire pour les différents groupes de cette série (Figure 67). Tandis que, la variabilité des groupes eux-mêmes, indiquée dans la Figure 68, signale une saisonnalité remarquable avec une dominance des groupes de grandes tailles et/ou intermédiaires en hiver et au printemps.

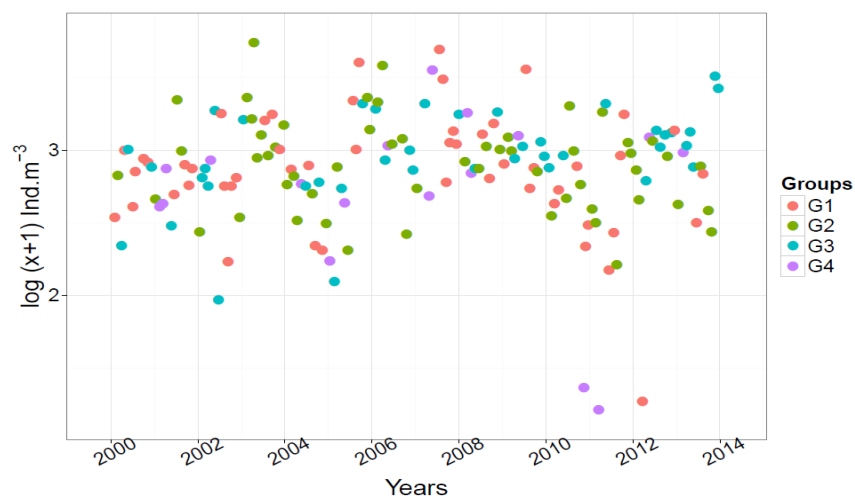


Figure 67: Evolution des abondances du zooplancton total en fonction de la distribution des groupes issus de l'analyse des spectres cumulés au point B2 pour la période de 2000-2013.

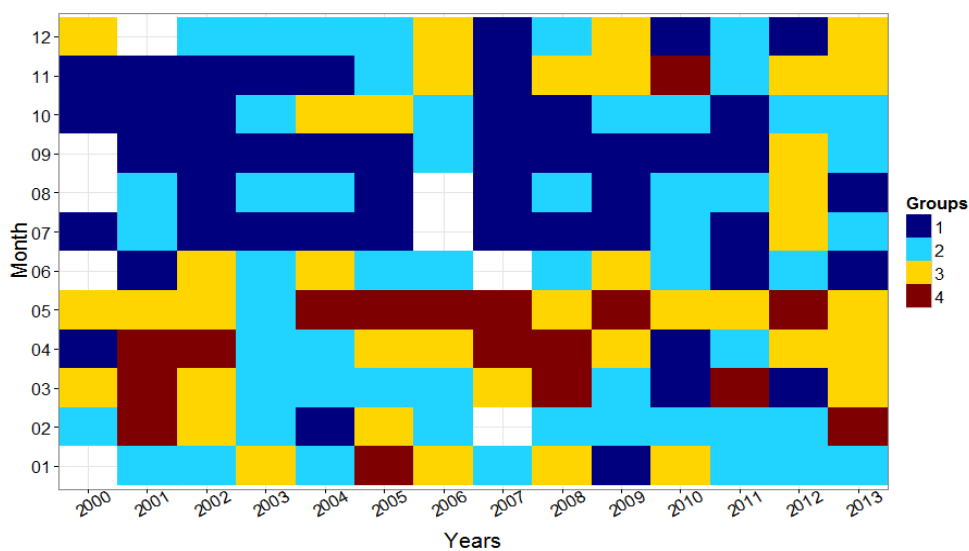


Figure 68 : Variabilité interannuelle et saisonnière des groupes issus des spectres de taille cumulés du zooplancton total au point B2 (2000-2013). Les cases blanches représentent les mois sans valeurs

## Discussion

Dans cette étude, on traite les NB-SS sur tout le zooplancton en environnement côtier. L'analyse des spectres de taille des copépodes seul n'a montré aucune variation claire au niveau de la distribution des groupes de classe de taille différente et n'ont pas été étudiés. La classe de taille du zooplancton a été établit entre une valeur minimale de  $0.00331 \text{ mm}^3$  et maximale de  $129.063 \text{ mm}^3$ . C'est dans cette gamme de taille que les spectres du zooplancton au point B2 existent et prennent des valeurs quantitatives.

L'analyse des pentes des spectres basés sur les fréquences absolues suggèrent une variabilité interannuelle dominante et saisonnière mineure de la communauté du zooplancton (Figure 64). L'ensemble du zooplancton a montré une augmentation de la taille dans les années où les abondances sont relativement élevées (2000, 2003, de mi-2005 jusqu'à 2009 et 2012). A échelle saisonnière, cette augmentation a été remarquée entre le printemps et l'automne. Alors que les hivers ont été caractérisés par la présence des individus de petites tailles à l'exception de la période de l'*EMT-like* (de mi-2005 jusqu'à 2009). Cette relation taille - abondance a été démontrée par Woodward et al. (2005) et White et al. (2007). Dans le chapitre précédant, on a démontré que les apports continentaux riches en éléments nutritifs ainsi que l'effet de l'*EMT-like* affectent l'abondance du zooplancton au point B2 et probablement les spectres de taille. Nos résultats ont montré que, durant les années à fortes productions, le rapport entre les individus de grandes et de petites tailles a augmenté dans les échantillons. Donc, l'analyse des pentes nous a apporté les premiers signes sur la structure en taille de la communauté du zooplancton.

Suite à la construction des spectres cumulés des fréquences relatives, on aperçoit la forme des spectres correspondante à chaque groupe. Une variabilité saisonnière majeure a été remarquée dans la distribution des groupes de tailles différentes. C'est à partir de la fin d'automne jusqu'au printemps que les spectres deviennent plus larges et le zooplancton augmente de taille et devient plus gros. L'analyse des corrélations a mis en évidence une certaine relation entre les différents groupes de taille et les facteurs environnementaux (Tableau 8). Au contraire des sels nutritifs, les variables physiques (température et salinité) ont montré une corrélation statistiquement significative. Alors, on suggère que la structure en taille de l'écosystème pélagique au point B2 semble répondre aux variations environnementales surtout hydrologiques. Normalement, on trouve une colonne d'eau homogène et mélangée en hiver. Au



printemps, la thermocline commence à s'établir et la stratification prend sa place à partir du mois de mai. En tenant compte du cycle de vie des organismes zooplanctoniques (phase de croissance, reproduction, ponte, recrutement, etc...), on peut dire que l'augmentation de la forme des spectres est peut être associée au phénomène de la convection dans la colonne d'eau. Durant la période printanière, les individus augmentent de taille et probablement deviennent plus matures quant à l'apparition de la thermocline. Ceci explique l'augmentation de la biomasse du zooplancton total, vue dans le chapitre 3, au moment d'une faible abondance pendant ces deux saisons. Stemmann et al. (submitted) ont observé un résultat analogue au point B à Villefranche-sur-mer. La variation de la forme des spectres de taille des copépodes a été attribuée à la composition taxonomique et à l'arrivée des copépodes juvéniles (l'âge des espèces dominantes).

Tableau 8 : Corrélation entre les groupes de taille et les variables hydrologiques, n = nombre des échantillons, r = coefficient de corrélation,  $\alpha = 0.05$ .

<b>Variables</b>	<b>n</b>	<b>r</b>	<b>p-value</b>
Température	162	0.17	0.0295
Salinité	162	0.17	0.0333
Phosphate	162	0.04	0.6551
Nitrates	162	-0.15	0.0647
Nitrites	162	-0.03	0.6873

Dans le cas des spectres à fréquences absolues, on a aperçu davantage la variabilité interannuelle des spectres des communautés zooplanctoniques reflétant les abondances. Tandis que dans le cas des spectres cumulés, le cycle saisonnier des tailles a été mieux distingué. Les variations de pentes et de formes de spectres sont dépendantes des forçages hydrologiques et ont reflété les variations environnementales survenues au point B2. Il est probable que la dynamique de la structure en taille reflète celle du système marin. Donc en milieu oligotrophe, elles peuvent être considérées comme des bons indicateurs d'un écosystème planctonique marin soumis à des forçages environnementaux variables. Nos résultats s'accordent avec les observations de Vandromme et al. (2014) dans le Golfe de Biscay situé au Nord-Ouest de l'atlantique, par Garcia-Comas (2009) à la station MC dans la mer Ligure et par Trudnowska et al. (2014) à Hornsund dans l'archipel de Svalbard pour les communautés planctoniques aquatiques. Les

auteurs ont associé la variabilité dans le spectre NB-SS aux variables hydrologiques et géographiques des régions correspondantes. Par contre, ils contredisent Romagnan (2013) dans son étude à Villefranche- sur-mer, Quinones et al. (2003) à l'Atlantique Nord et San Martin et al. (2006) dans l'océanique Atlantique qui ont trouvé une certaine stabilité dans les spectres NB-SS de plancton et une indépendance de l'environnement hydrologique. De plus, Garcia-Comas (2009) a détecté une dominance de la variabilité interannuelle des spectres des copépodes à Naples. Tandis que, Romagnan (2013) a révélé des motifs saisonniers décelables d'après l'analyse de la pente des spectres locaux du plancton total au point B.

## Conclusion

Les spectres de taille du zooplancton total au point B2 présentent une certaine dynamique marquée au cours du temps. Les spectres ne sont pas similaires en termes de pente et de forme et semblent répondre aux forçages hydrologiques à différentes échelles. La dynamique des pentes présente une relation significative avec les abondances du zooplancton et suggère une variation saisonnière mineure et une variation interannuelle majeure ; tandis que l'analyse de la forme de ces spectres révèle une dynamique saisonnière plus avancée et relativement stable au cours des années. Pour la période entre la fin d'automne et le printemps, le zooplancton augmente de taille et devient plus mature. Les résultats préliminaires de cette étude peuvent être utilisés à l'échelle d'une année ou bien à une échelle interannuelle. Dans notre cas, les deux méthodes d'analyse des spectres NB-SS pourront être applicables pour assurer un suivi plus automatisé et homogène des eaux côtières libanaises. Cependant, on utilisera plutôt les spectres cumulés pour montrer les variations saisonnières.

L'étude de l'écosystème zooplanctonique au point B2 par les spectres NB-SS seuls, reste à développer d'une manière plus profonde ; elle doit être complétée par une étude taxonomique plus détaillée et compilée à des fréquences d'échantillonnage plus élevées.

## Chapitre 6 : Discussion Générale

Le présent travail s'est intéressé à la caractérisation d'une série temporelle de zooplancton du bassin Levantin prise au point B2 dans les eaux libanaises avec un filet de 52  $\mu\text{m}$  depuis l'année 2000 jusqu'à 2013 à fréquence mensuelle. Le système d'imagerie numérique, le Zooscan, a été utilisé comme une nouvelle méthode d'analyse et d'identification semi-automatique des individus et des mesures morpho-métriques incluant la taille. Au total, 175 échantillons ont été analysés pour explorer la structure et la distribution des populations zooplanctoniques à la fois à une échelle saisonnière et à une échelle interannuelle. Dans le but d'apercevoir un effet de changement hydrologique et climatique possible et extraire une tendance à long terme, les variations saisonnières interannuelles ont été discutés en fonction des facteurs environnementaux (la température, la salinité, les phosphates, les nitrates, les nitrites) et biologiques (la concentration en chlorophylle-*a* et les concentrations des populations phytoplanctoniques). Dans la zone d'étude, le zooplancton est aussi sujet à une forte pression côtière naturelle et anthropique. Dans la zone d'étude, le zooplancton est aussi sujet à une forte pression côtière naturelle et anthropique. Cette situation tient en partie au fait que, malgré ses caractéristiques géographiques (distance de la côte, profondeur, bathymétrie,...etc.) qui l'appartient aux eaux de large, le point B2 est soumis aux influences de deux sources continentales de nutriments (la rivière d'Al-Jaouz riche en nitrates et l'usine chimique de Selaata riche en orthophosphates). C'est dans ce contexte que se positionne ce travail sur le zooplancton en apportant les éclaircissements correspondants.

### Limitation de l'appareil et de la méthodologie

L'utilisation du filet 52  $\mu\text{m}$  nous permet une meilleure représentation du zooplancton de petites tailles en termes d'abondances en comparaison avec d'autres filets de vide de maille plus grands (Gallienne et al. 2001). Dans la méditerranée, Calbet et al. (2001) et Zervoudaki et al. (2006) ont trouvé une sous-estimation de 2-8 à 20 fois des stades adultes et copépodites du genre *Oithona* et *Oncaea* par un filet de 200  $\mu\text{m}$ , par rapport à un filet de 52  $\mu\text{m}$ . Dans notre étude, la principale limite technique de la méthodologie et de l'appareil provient tout d'abord de i) la phase de séparation de chaque échantillon en deux fractions d1 (>150  $\mu\text{m}$ ) et d2 (entre 50 et 150  $\mu\text{m}$ ) et ii) la résolution de l'image et du seuil choisi pour la reconnaissance du zooplancton. Du

fait que la limite de détection de cet appareil a été fixée à 300  $\mu\text{m}$ , tout le zooplancton issu de la petite fraction d2 (entre 50 et 150  $\mu\text{m}$ ) et une partie des communautés zooplanctoniques (entre 150 et 300  $\mu\text{m}$ ) issue de la grande fraction d1 n'a pas été pris en considération. Par conséquent, on ne peut plus obtenir la totalité du spectre de taille du mésozooplancton. Etant donné les fortes abondances d'organismes de petites classes de tailles dans un milieu oligotrophes (Siokou-Frangou et al. 2010 ; Turner 2004), il sera fondamental d'améliorer les capacités de reconnaissance du système afin de pouvoir analyser dans le futur la série d'image en considérant des objets plus petits. Peut-être la détection de la petite fraction d2 surpasse la capacité de l'appareil, mais un seuil plus petit (par exemple de 150  $\mu\text{m}$ ) sera plus rentable et des résultats plus fiables seront obtenus. Cependant, ce point posera un problème quant à la comparaison des abondances obtenues avec d'autres régions.

Les gélatineux présentent aussi dans cette étude un problème concernant la sous-estimation de leurs abondances. D'une part, la pression de l'eau dans le filet et la conservation dans le formol à long terme abiment les organismes qui deviennent plus difficile à reconnaître. De l'autre part, la flottaison de ces organismes dans la cellule de scan rend aussi leur identification plus difficile. Ces erreurs sont donc difficilement quantifiables mais sont systématiques tout au long de la série temporelle car la méthodologie a été homogène depuis l'année 2000.

### **Variabilité saisonnière comparée dans les différents bassins Méditerranéens**

En ce qui concerne la composante saisonnière, les résultats majeurs de cette étude montrent le cycle annuel de la communauté du zooplancton en fonction des facteurs environnementaux suivant un modèle montrant une certaine succession écologique des groupes. Il faut souligner que dans cette région très peu d'études sur le zooplancton ont été réalisées. Le zooplancton a indiqué un pic de biomasse printanier où les conditions environnementales sont favorables au développement typique du phytoplancton, suivi par une augmentation des abondances en été du zooplancton.

Une corrélation significative a été trouvée entre le zooplancton et la chlorophylle-*a* dans la Méditerranée (Nowaczyk et al. 2011). Les auteurs ont démontré que la distribution des

copépodes a été surtout pilotée par la disponibilité de la chlorophylle dans le milieu. Dans cette section, on se servira des mesures satellite analysées par D'Ortenzio and Ribera d'Alcalà (2009) et les bases de données des copépodes fournies par NMFS-COPEPOD (2009) dans la Méditerranée pour mettre en évidence la dynamique saisonnière du zooplancton des différentes régions. D'Ortenzio and Ribera d'Alcalà (2009) ont caractérisé la biogéographie de la Méditerranée et le cycle saisonnier de la biomasse phytoplanctonique en surface. Une régionalisation a été conduite dans le but d'identifier la similarité dans les cycles saisonniers de la chlorophylle d'origine satellitaire à la surface de l'eau de chaque zone. Ce travail a souligné la présence de sept clusters (régions) qui diffèrent par la concentration maximale et la période des floraisons (Figure 69). Ces clusters peuvent être regroupés en 4 groupes géographiques distincts des plus oligotrophes aux plus eutrophes :

- les clusters 1, 2 et 3 appartiennent à la région de "No bloom" et occupent presque toute la Méditerranée orientale et le Sud de la Méditerranée occidentale. Ils sont caractérisés par un cycle saisonnier marqué par un maximum en automne et hiver.
- Le cluster 4 appartient à la région "Intermittente" et de nombreuses régions de circulation cyclonique (Rhodes, Sud de l'Adriatique, Nord-Ouest de l'Ionien, Ouest du Tyrrhénien). Il présente un maximum de chlorophylle détecté en hiver (février et mars) et une faible augmentation en octobre.
- Le cluster 5 appartient à la région "Bloom" et est marqué par une efflorescence printanière (Nord-Ouest de la Méditerranée occidentale).
- Les clusters 6 et 7 appartiennent à la région "Côtière" et montrent un cycle saisonnier moins marqué. Ils présentent un maximum vers la fin de l'été et début de l'automne (Nord et Ouest de l'Adriatique, Est de la Tunisie).

La superposition de cette distribution spatiale avec les bases de données des copépodes nous a permis donc de discuter la phénologie du zooplancton à une échelle plus grande. Dans cette section, on n'en prend compte que les séries de Baléare, de Villefranche-sur-mer, de Naples, de la Grèce et celle de la présente étude (Figure 69).

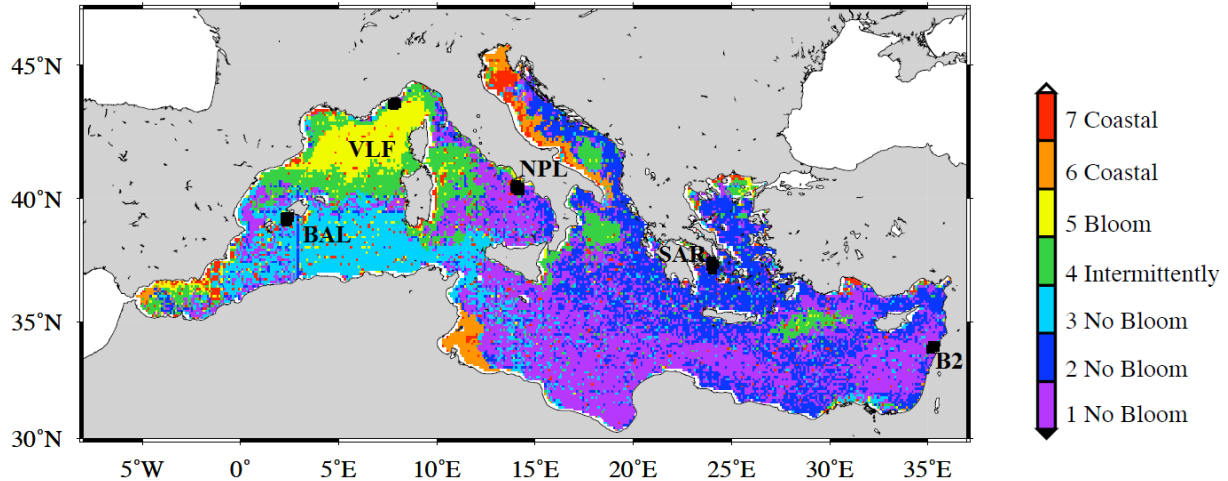


Figure 69: Distribution spatiale de la chlorophylle dans la Méditerranée en des groupes obtenus par l'analyse en dendrogramme de K-means d'une série allant de 1997 à 2007 (D'ortenzio and Ribera d'alcalà, 2009) et localisation des stations d'échantillonnage fixes du zooplancton selon (NMFS-COPEPOD 2009) BAL = Baléare, VLF = Villefranche- sur-mer, NPL = Golfe de Naples et SAR = Saronikos, en plus de B2 = Batroun.

Dans un premier temps, la dynamique saisonnière des copépodes (Figure 70) montre une coïncidence des pics d'abondances des copépodes avec la chlorophylle satellitaire et parfois un décalage d'un mois dans certaines régions. Pour les séries temporelles signalées à Villefranche-sur-mer (Vandromme et al. 2012) et au Baléare (Fernández de Puelles et al. 2003 ; 2007), on a aperçu un cycle saisonnier des copépodes très marqué qui présente des abondances maximales à la fin d'automne - début du printemps (mars - avril). A Naples, le cycle annuel est moins marqué et présente une abondance maximale au printemps (avril) qui s'étend jusqu'à l'été (Mazzocchi and Ribiera D'alcalà 1995 ; Mazzocchi et al. 2007) ; tandis ce que ce cycle est beaucoup moins marqué au Golfe de Saronikos (Siokou-Frangou 1996 ; Christou and Moraitou-Apostolopoulo 1995) et au point B2 (cette étude). D'une manière générale, la saisonnalité des copépodes est de plus en plus perdue selon le gradient d'oligotrophie (Ouest – Est) et est en accord avec la carte présentée par D'Ortenzio and Ribera d'Alcalà (2009). Peut-être aussi à cause de la température plus élevée où la reproduction pourrait être continue, comme c'est le cas des zones tropicales.

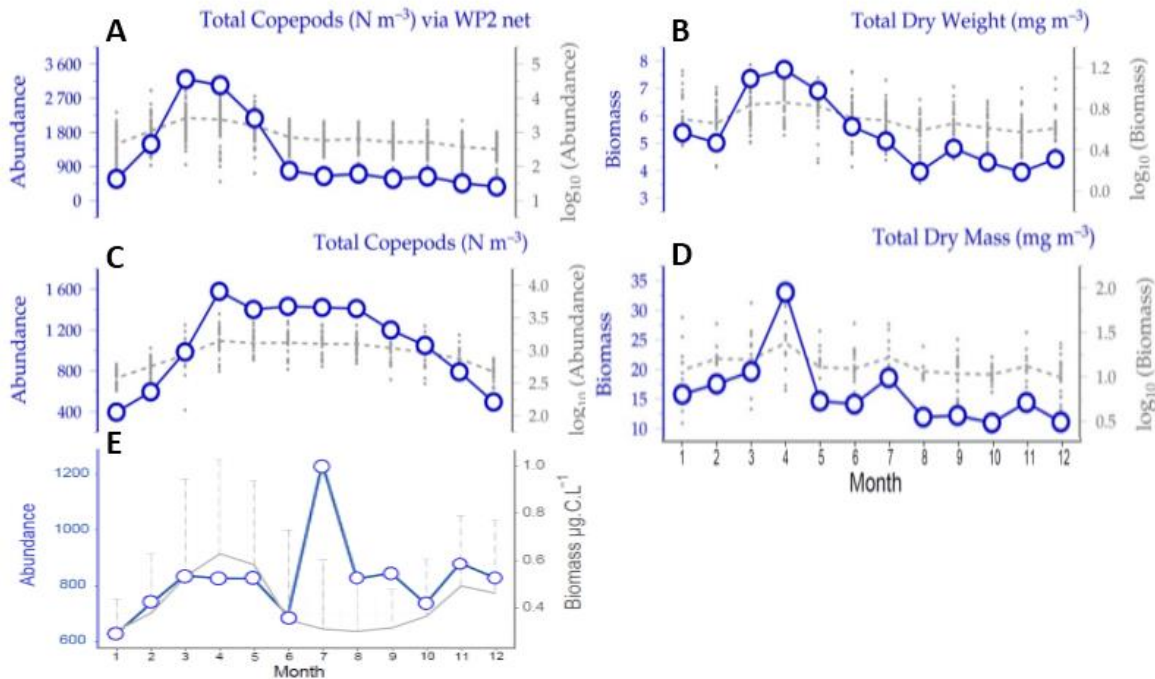


Figure 70 : Cycle annuel des abondances et/ou de biomasse des copépodes à A) Villefranche-sur-mer, B) Baléare, C) Golfe de Naples, D) Golfe de Saronikos (selon NMFS-COPEPOD (2009)) et au E) point B2.

### Variabilité interannuelle

Durant la période d'étude, un réchauffement printanier progressif a été noté dans la couche de surface ainsi que l'arrivée de l'EMT-like à la partie est du bassin entre 2005 et 2010. Un fort impact de ce dernier a été traduit par l'augmentation des abondances et des biovolumes du zooplancton pouvant exercer un contrôle de type "top-down" sur la production primaire. De même, la zone d'étude a été sujette à des fluctuations locales causées par les effluents anthropiques d'origine continentale pouvant atteindre les eaux de large. Ces changements à plus courtes échelles de temps masquent peut être la variabilité à long terme.

#### - Impact du changement climatique en Méditerranée

Le réchauffement climatique est actuellement recensé dans tous les écosystèmes marins (Beaugrand and Goberville 2010). Ce changement a été observé depuis le plancton jusqu'à des niveaux trophiques plus élevés, que ce soit au niveau de la phénologie ou de la biogéographie (Beaugrand 2009 ; Beaugrand and Reid 2003). Suite à l'augmentation de la température de



surface de l'eau, des migrations rapides du zooplancton caractérisant les eaux chaudes ont été signalées (Beaugrand et al. 2009) et a provoqué la sub-tropicalisation de différentes régions (Montero-Serra et al. 2015). La zone côtière méditerranéenne apparaît être la région la plus sensible au changement climatique (Parry 2000). Elle abrite une diversité biologique élevée, des systèmes biologiques complexes très productifs. Le bassin oriental vit la tropicalisation par des migrants "lessepsiens" colonisateurs venant de la mer Rouge à travers le canal de Suez. Ce dernier, le chemin le plus privilégiée et le plus prolifique et afin de conserver sa part du marché, est en train de subir un aménagement dans le but de l'élargir (Galil et al. 2015) afin de conserver sa part du marché. Malheureusement, aucune action n'est prise pour contrôler et diminuer le flux des espèces invasives à travers ce canal. A l'heure, les observations des migrations d'espèces à affinités chaudes se multiplient. Récemment durant l'été 2015, on a remarqué une augmentation exceptionnelle de l'abondance des méduses d'origine indo-pacifique "*Rhopilema nomadica*" où la prolifération de cette méduse planctonivore a été observée tout au long de la côte libanaise. De point de vue socio-économique, cette espèce a une mauvaise réputation à cause de son impact négative sur les touristes, la pêche et les installations des usines à la côte ([www.bbc.co.uk/news/world-middle-east-14038729](http://www.bbc.co.uk/news/world-middle-east-14038729)). De même, une autre espèce invasive indo-pacifique "*Marivagia stellata*", considéré comme indicateur du réchauffement climatique, a été signalée la première fois sur les côtes israéliennes en été 2010 (Galil et al. 2010) et nouvellement au Liban en été 2015 tout en coïncidant une canicule. On se pose la question sur l'impact de ces présences brusques et intenses dans ces dernières années et les conséquences sur le zooplancton au Liban. Le bouleversement programmé du climat en Méditerranée conditionne donc les déplacements spatiaux des espèces leur permettant de se maintenir dans des conditions environnementales favorables à leur croissance et leur reproduction. Bien que, les études correspondantes y restent toujours en cours de développement.

- *Impact du changement hydrologique sur la distribution chlorophyllienne dans la Méditerranée orientale*

Dans un premier temps, il a été montré par des mesures *in situ* que la nutricline s'est élevée vers la couche euphotique supérieure du bassin Levantin durant la période EMT (Klein et al. 1999). Plus récemment, Kress et al. (2014) ont signalé de nouveau le même phénomène dans la partie Est du bassin levantin à partir de 2008. Les auteurs ont suggéré un changement de la

communauté phytoplanctonique dans la couche de surface et de sub-surface du fait de l'élévation de la chlorophylle-*a* maximale profonde de ~110 m (Christaki et al. 2001 ; Dolan et al. 2002 ; Lazzari et al. 2012) jusqu'à 75 m de profondeur de la couche de sub-surface. La structure s'est avérée quasi-permanente durant toute l'année sauf en hiver, la période où la colonne d'eau se mélange (Crispi. G. et al. 1999 ; Siokou-Frangou et al. 2010).

Dans son étude dans le bassin levantin, Delpech (2015) a calculé le produit scalaire des premiers axes des Analyses des Composantes Principales (ACP) correspondant aux facteurs hydrologiques et à la chlorophylle-*a* dans le but de souligner l'existence d'une similarité ou dissimilarité. Les résultats ont montré un degré de similarité plus grand entre la chlorophylle-*a* et la salinité (-0.5) qu'avec la température (0.2). Étant donné des mesures satellitaires de la couche de surface, les résultats n'ont pas mis en évidence une idée claire sur la remontée et l'élargissement de la couche de chlorophylle maximale en profondeur discernées par Klein et al. (1999) et Kress et al. (2014). Cependant, les années EMT-*like* ont été plutôt plus riches que les autres années, surtout en 2006. Delpech (2015) a émis une hypothèse basée sur le changement dans la circulation de l'eau de surface et intermédiaire du Levantin durant les années EMT-*like* avec moins d'eau atlantique modifiée qui parvient au bassin et le blocage de la circulation de l'eau intermédiaire du Levantin (Theocharis et al. 2002 ; 2014). L'augmentation des concentrations chlorophylliennes en Levantin apparaît être contrôlée par la circulation thermohaline créée à la fois par le flux des eaux crétoises denses et les faibles températures durant l'hiver. Cette étude préliminaire a contribué à mieux comprendre la caractérisation de la distribution de la chlorophylle à la surface du bassin Levantin au cours de l'EMT-*like*.

## Conclusion et perspectives

Dans cette étude il est présenté pour la première fois dans les eaux libanaises l'analyse d'une série de zooplancton (2000-2013) récolté à la station B2 (N34° 14.856 ; E35° 36.067 ; Batroun, Nord Liban) avec un filet de 52 µm et analysé à l'aide du système d'imagerie semi-automatique, le Zooscan. Le travail a contribué à élargir les connaissances concernant la caractérisation et la variation du zooplancton côtier. Une variabilité temporelle à plusieurs échelles de temps est présentée ainsi que des informations préliminaires sur le spectre des tailles du zooplancton. Cette nouvelle approche permet d'identifier les mécanismes et les processus physiques et biologiques responsables de la variabilité du zooplancton au point B2 et à comprendre le forçage hydrologique et climatique à une échelle plus grande dans le bassin Levantin. Le Zooscan est un outil idéal pour traiter les séries temporelles. Il permet d'analyser rapidement l'abondance, la biomasse, la structure en taille et la composition des communautés zooplanctoniques et capable de détecter les changements à long terme. Il constitue des archives digitales à long terme et un gain de temps important. Cependant, la résolution taxonomique n'est pas très résolutive mais l'analyse détaillée des échantillons par comptage traditionnel peut se faire ultérieurement d'une manière orientée par les résultats présents.

Ces résultats ont montré que les copépodes est le groupe le plus abondant dans les eaux libanaises avec une dominance du genre *Oithona*, suivis par les appendiculaires, les annélides, les chaetognathes et les cladocères du genre *Evadne*. D'une manière générale, **la production phytoplanctonique printanière a favorisé l'augmentation de biomasse du zooplancton. En fait, l'abondance du zooplancton a augmenté en été, probablement suite à la phase de recrutement.** Cette variation apparaît être dépendante des facteurs environnementaux surtout physiques. Dans le futur, une fréquence d'échantillonnage bimensuelle ou hebdomadaire (au moins durant les périodes de changement rapide) nous permettrait de lier les variations de l'environnement aux dynamiques de populations afin de i) mettre en évidence la phénologie correspondante et ii) améliorer les concepts de la succession planctonique proposés dans ce travail.

La variabilité interannuelle du zooplancton au point B2 a été évaluée et interprétée selon trois échelles temporelles différentes. **L'évolution à long terme** des paramètres

environnementaux physico-chimiques et du zooplancton ont montré des conditions stables. Malgré cela, un réchauffement printanier a été détecté dans la couche de surface. Cette situation s'est répercutée sans doute sur les communautés zooplanctoniques. Cependant, la compréhension du système zooplanctonique et des futurs changements nécessite des études à plus long terme d'où l'importance de continuer l'échantillonnage pour avoir une série plus longue. **A échelle interannuelle**, les résultats ont montré que la salinité a augmenté dans la colonne d'eau à partir de 2005. L'intrusion de l'EMT-like dans le bassin Levantin durant cette période, confirmée par les études précédentes, a augmenté rapidement la densité zooplanctonique exerçant potentiellement un contrôle de type "top down" sur le phytoplancton dans la zone d'étude. **A une courte échelle** (intra-annuelle), les résultats suggèrent que le zooplancton au point B2 répond aux variations saisonnières conditionnées par le forçage climatique et les apports continentaux d'origine anthropiques. Ces interprétations restent toujours limitées au fait du manque en spécificité des espèces. Il est possible dans des études ultérieures d'identifier le zooplancton à des niveaux taxonomiques plus bas, avec des améliorations dans les performances de l'appareil d'une part, ou par une identification microscopique d'autre part.

La présente étude a mis en lumière la dynamique temporelle des spectres de taille de l'ensemble du zooplancton mesurée automatiquement par le système d'imagerie, le Zooscan. Les spectres NB-SS dévoilent un changement dans la dynamique des populations et varient en fonction du temps et en fonction des paramètres hydrologiques mesurés. Les résultats suggèrent une variation interannuelle de la dynamique des pentes et une augmentation de la taille du zooplancton entre fin d'automne et le printemps qui deviennent mature. **Le spectre de taille du zooplancton est un indice synthétique efficace pour détecter des changements dans l'écosystème pélagique au Liban** et aussi plus rapide que les études taxonomiques.

Dans les études ultérieures, il serait intéressant :

- d'utiliser parallèlement un deuxième filet de vide de maille plus grand (par exemple WP2 de 200 microns) afin d'avoir une idée plus importante sur l'ensemble des populations zooplanctoniques présentes qui sont de tailles plus grandes
- de coupler le Zooscan au Flowcam et à la cytométrie en flux pour avoir un spectre de taille NB-SS couvrant tout le plancton allant du picoplancton jusqu'au mésozooplancton.

Le travail doit être poursuivi au même point d'échantillonnage pour évaluer d'une part les conséquences à long terme de l'effet du changement climatique et d'autre part, la répétitivité et la nature cyclique de l'EMT décrit précédemment. De même, de combiner cette étude temporelle à une étude spatiale pour i) déterminer l'homogénéité de la distribution biogéographique des communautés zooplanctoniques côtières et ii) évaluer la possibilité d'utiliser ce site comme point représentatif pour toute la région. Enfin, ce serait un peu ambitieux mais idéal que plusieurs laboratoires se réunissent pour choisir des points fixes en Méditerranée et effectuer en parallèle des échantillonnages à long terme et couvrant toute l'année.

## Bibliographie

ABBOUD-ABI SAAB, M. Contribution à l'étude des populations microplanctoniques des eaux côtières libanaises (Méditerranée Orientale). Université Aix-Marseille II, 1985.

ABBOUD-ABI SAAB, M., M. FAKHRI AND A. E. R. HASSOUN. Inter-annual variations of water and air temperatures in Lebanese coastal waters (2000-2012). In *Oceanography & Sustainable Marine Production: A Challenge of Managing Marine Resources in a Changing Climate - ICOSMaP – 2013*. Kuantan- Malaysia, 2013.

ABBOUD-ABI SAAB, M., M. FAKHRI, M. T. KASSAB AND N. MATAR. Effect of distance from the coast on phytoplanktonic populations in Lebanese coastal waters during 2008-2009. In *INOC-Tischreen University, International conference on Biodiversity of the Aquatic Environment*. Tischreen University, Syria, 2010, p. 518-531.

ABBOUD-ABI SAAB, M., M. FAKHRI, E. SADEK AND N. MATAR An estimate of the environmental status of the Lebanese littoral waters using nutrients and chlorophyll-a as indicator. *Lebanese Science Journal*, 2008, 9(1), 43-60.

ABBOUD-ABI SAAB, M., J. C. ROMANO, N. BENSOUSSAN AND M. FAKHRI Suivis temporels comparés de la structure thermique d'eaux côtières libanaises (Batroun) et françaises (Marseille) entre juin 1999 et octobre 2002. *C. R. Geoscience*, 2004, 336, 1379-1390.

ABBOUD-ABI SAAB, M., K. SLIM AND R. ANDARY Contribution à l'étude physico-chimique et biologique du fleuve Nahr El Jawz et son apport nutritif au milieu marin. *Hanoun*, 1999-2002, XXV, 105-128.

ABBOUD - ABI SAAB, M. AND A. ATALLAH Impact de plusieurs sources de pollution sur les populations microplanctoniques des eaux côtières de Batroun. *Lebanese Science Research Report*, 1996, 1(1), 51-61.

AL-HAJJ, Z. AND C. MUSCAT. From Europe to the mediterranean. A Greenpeace report focusing on pollution by the fertiliser industry and the shift of such dirty technologies from Europe to developing countries in the Mediterranean. *Greenpeace Report*: 2000.

ALCARAZ, M., A. CALBET, M. ESTRADA, C. MARRASE, et al. Physical control of zooplankton communities in the Catalan Sea. *Progress in Oceanography*, 2007, 74(2-3), 294-312.

- ALHEIT, J. AND A. BAKUN Population Synchronies Within and Between Ocean Basins: Apparent Teleconnections and Implications as to Physical-Biological Linkage Mechanisms. *Journal of Marine System*, 2010, 79, 267-285.
- ALLAIN, C. Les poissons et les courants. *Rev. Trav. Inst. Pêches marit.*, 1964, 28(4), 401-426.
- AMARA, R. Impact de l'anthropisation sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes marins. Exemple de la Manche-mer du nord. 2010.
- ANNABI-TRABELSI, N., M. N. DALY-YAHIA, M. S. ROMDHANE AND N. BEN MAÏZ Seasonal variability of planktonic copepods in Tunis North Lagoon (Tunisia, North Africa). *Cahiers De Biologie Marine*, 2005, 46, 325-333.
- AUBRY, F. B., G. COSSARINI, F. ACRI, M. BASTIANINI, et al. Plankton communities in the northern Adriatic Sea: Patterns and changes over the last 30 years. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, 115(0), 125-137.
- AUGER, P. A., C. ULSES, C. ESTOURNEL, L. STEMMANN, et al. Interannual control of plankton communities by deep winter mixing and prey/predator interactions in the NW Mediterranean: Results from a 30-year 3D modeling study. *Progress in Oceanography*, May 2014, 124, 12-27.
- BACHILLER, E. AND X. IRIGOIEN Allometric relations and consequences for feeding in small pelagic fish in the Bay of Biscay. *Ices Journal of Marine Science*, 2013, 70, 232-243. doi:210.1093/icesjms/fss1171.
- BAKER, M., S. NOUREDDIN, N. HAMOUD, H. MAYHOUB, et al. Influence des caractéristiques hydrochimiques des eaux côtières de Lattaquie sur les communautés phyto- et zooplanctoniques. *Tishreen University Journal*, 1994b, 2, 71-125.
- BAKER, M., S. NOUREDDIN AND A. K. YOUSSEF Estimation préliminaire de la biomasse zooplanctonique et des flux de matière dans les eaux côtière de Lattaquie. *Tishreen University Journal*, 1994a, 2, 21-44.
- BANSE, K. Zooplankton - Pivotal Role in the Control of Ocean Production. *Ices Journal of Marine Science*, 1995, 52(3-4), 265-277.
- BATTEN, S. D. AND D. L. MACKAS Shortened duration of the annual *Neocalanus plumchrus* biomass peak in the Northeast Pacific. *Marine Ecology Progress Series*, 2009 2009, 393, 189-198.

- BEAUGRAND, G. Monitoring pelagic ecosystems using plankton indicators. *Ices Journal of Marine Science*, May 2005, 62(3), 333-338.
- BEAUGRAND, G. Decadal changes in climate and ecosystems in the North Atlantic Ocean and adjacent seas. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2009, 56(8–10), 656-673.
- BEAUGRAND, G., A. CONVERSI, S. CHIBA, M. EDWARDS, et al. Synchronous marine pelagic regime shifts in the Northern Hemisphere. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, Jan 5 2015, 370(1659).
- BEAUGRAND, G. AND E. GOBERVILLE Conséquences des changements climatiques en milieu océanique. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne]*, Hors-série 8 | octobre 2010, mis en ligne le 22 octobre 2010, consulté le 29 juillet 2015. URL : <http://vertigo.revues.org/10143>, 2010.
- BEAUGRAND, G. AND F. IBANEZ Monitoring marine plankton ecosystems. II: Long-term changes in North Sea calanoid copepods in relation to hydro-climatic variability. *Marine Ecology-Progress Series*, 2004, 284, 35-47.
- BEAUGRAND, G. AND R. R. KIRBY Climate, plankton and cod. *Global Change Biology*, Apr 2010, 16(4), 1268-1280.
- BEAUGRAND, G., C. LUCZAK AND M. EDWARDS Rapid biogeographical plankton shifts in the North Atlantic Ocean. *Global Change Biology*, Jul 2009, 15(7), 1790-1803.
- BEAUGRAND, G. AND P. C. REID Long-term changes in phytoplankton, zooplankton and salmon related to climate. *Global Change Biology*, Jun 2003, 9(6), 801-817.
- BEAUGRAND, G., P. C. REID, F. IBANEZ, J. A. LINDLEY, et al. Reorganization of North Atlantic marine copepod biodiversity and climate. *Science*, May 2002, 296(5573), 1692-1694.
- BENDSHNEIDER, K. AND R. J. ROBINSONS A new spectrophotometric method for the determination of nitrite in sea water. *J. Mar. Res.*, 1952, 11, 87-96.
- BEN LAMINE, Y., O. PRINGAULT, M. AISSI, C. ENSIBI, et al. Environmental controlling factors of copepod communities in the Gulf of Tunis (south western Mediterranean Sea). *Cahiers De Biologie Marine*, 2015 2015, 56(3), 213-229.



BERGAMASCO, A. AND P. MALANOTTE-RIZZOLI The circulation of the Mediterranean Sea: a historical review of experimental investigations. *Advances in Oceanography and Limnology*, 2010/06/01 2010, 1(1), 11-28.

BERLINE, L., L. SIOKOU-FRANGOU, I. MARASOVIC, O. VIDJAK, et al. Intercomparison of six Mediterranean zooplankton time series. *Progress in Oceanography*, May-Jul 2012, 97, 76-91.

BERMAN, T., D. W. TOWNSEND, S. Z. ELSAYED, C. C. TREES, et al. OPTICAL TRANSPARENCY, CHLOROPHYLL AND PRIMARY PRODUCTIVITY IN THE EASTERN MEDITERRANEAN NEAR THE ISRAELI COAST. *Oceanologica Acta*, 1984, 7(3), 367-372.

BREIMAN, L. Random forests. *Machine Learning*, 2001, 45, 5-32.

BUSTILLOS-GUZMAN, J., H. CLAUSTRE AND J. C. MARTY Specific phytoplankton signatures and their relationship to hydrographic conditions in the coastal northwestern Mediterranean Sea. *Marine Ecology-Progress Series*, 1995, 124(1-3), 247-258.

CALBET, A. The trophic role of microzooplankton in marine systems. *Ices Journal of Marine Science*, 2008, 65, 325-331.

CALBET, A., S. GARRIDO, S. SAIZ, M. ALCARAZ, et al. Annual zooplankton succession in coastal NW Mediterranean waters: The importance of smaller size fractions. *Journal of Plankton Research*, 2001, 23(3), 319-331.

CARON, D. A. AND D. A. HUTCHINS The effects of changing climate on microzooplankton grazing and community structure: drivers, predictions and knowledge gaps. *Journal of Plankton Research*, 2013, 35, 235-252.

CHRISTAKI, U., A. GIANNAKOUREOU, F. VAN WAMBEKE AND G. GREGORI Nanoflagellate predation on auto- and heterotrophic picoplankton in the oligotrophic Mediterranean Sea. *Journal of Plankton Research*, 2001, 23, 1297-1310.

CHRISTOU, E. D. Interannual variability of copepods in a Mediterranean coastal area (Saronikos Gulf, Aegean Sea). *Journal of Marine Systems*, 1998, 15, 523-532.

CHRISTOU, E. D. AND M. MORAITOU-APOSTOLOPOULO Metabolism and feeding of mesozooplankton in the eastern Mediterranean (Hellenic coastal waters) *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1995, 126, 39-48.

CONVERSI, A., T. PELUSO AND S. FONDA-UMANI Gulf of Trieste: A changing ecosystem. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2009, 114(C3), C03S90.

- COSTALAGO, D., S. TECCHIO, I. PALOMERA, I. ÁLVAREZ-CALLEJA, et al. Ecological understanding for fishery management: Condition and growth of anchovy late larvae during different seasons in the Northwestern Mediterranean. *Estuarine, Coastal and Shelf. Science*, 2011, 93, 350-358.
- CRISPI. G., A. CRISE AND E. MAURI A seasonal three-dimensional study of the nitrogen cycle in the Mediterranean Sea: Part II. Verification of the energy constrained trophic model *Journal of Marine Systems*, 1999, 20, 357–379.
- CSN. Compendium statistique national sur les statistiques de l'environnement au Liban 2006. 2006.
- CUSHING, D. H. Plankton Production and Year-class Strength in Fish Populations: an Update of the Match/Mismatch Hypothesis. In J.H.S. BLAXTER AND A.J. SOUTHWARD eds. *Advances in Marine Biology*. Academic Press, 1990, vol. Volume 26, p. 249-293.
- CUSHING, D. H. The long-term relationship between zooplankton and fish: IV. Spatial/Temporal Variability and Prediction. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, June 1, 1995 1995, 52(3-4), 611-626.
- D'ORTENZIO, F. AND M. RIBERA D'ALCALÀ On the trophic regimes of the Mediterranean Sea: a satellite analysis. *Biogeosciences*, 2009, 6(2), 139-148.
- DALY YAHIA, M. N. Contribution à l'étude du milieu et du zooplancton de la lagune de Bou Grara. Systematique, biomasse et relations trophiques. Diplôme d'Etudes Approfondies. Faculté des Sciences de Tunis, Université de Tunis II. pp215, 1998.
- DALY YAHIA, M. N., S. SOUISSI AND O. D. YAHIA-KEFI Spatial and temporal structure of planktonic copepods in the Bay of Tunis (southwestern Mediterranean Sea). *Zoological Studies*, Apr 2004, 43(2), 366-375.
- DALY YAHIA, M. N., M. BATISTIC AND D. LUCIC et al. Are the outbreaks of *Pelagia noctiluca* more frequent in the Mediterranean basin? *ICES Coop Res Rep.*, 2010, 300, 8-14.
- DAVID, V., B. SAUTOUR, P. CHARDY AND M. LECONTE Long-term changes of zooplankton variability in a turbid environment: The Gironde estuary (France). *Estuar. Co. She. Sc.*, 2005, 64(2-3), 171-184.
- DE MADRON, X. D., C. GUIEU, R. SEMPERE, P. CONAN, et al. Marine ecosystems' responses to climatic and anthropogenic forcings in the Mediterranean. *Progress in Oceanography*, Oct 2011, 91(2), 97-166.

DELPECH, A. Inter-annual variability of ecosystem dynamics in the Eastern Mediterranean. MS Thesis, ENSTA ParisTech, 43 pp., 2015.

DEMIROV, E. AND N. PINARDI Simulation of the Mediterranean Sea circulation from 1979 to 1993: Part I. The interannual variability. *Journal of Marine Systems*, 2002, 33–34, 23–50.

DI MAURO, R., F. CAPITANIO AND M. DELIA VIÑAS Capture efficiency for small dominant mesozooplankters (copepoda, appendicularia) off Buenos Aires province (34°S-41°S), Argentina Sea, using two plankton mesh sizes. *Brazilian Journal of Oceanography*, 2009, 57(3), 205-214.

DOLAN, J. R., H. CLAUSTRE, F. CARLOTTI, S. PLOUVENEZ, et al. Microzooplankton diversity: relationships of tintinnid ciliates with resources, competitors and predators from the Atlantic Coast of Morocco to the Eastern Mediterranean. *Deep-Sea Research Pt.I*, 2002, 49, 1217–1232.

DOLBETH, M., M. CUSSON, R. SOUSA AND M. A. PARDAL Secondary production as a tool for better understanding of aquatic ecosystems. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Jul 2012, 69(7), 1230-1253.

DRIRA, Z. Contribution à la compréhension du fonctionnement du Golfe de Gabès étude des caractéristiques dynamiques et structurales des communautés phyto-zooplanktoniques en relation avec la variabilité environnementale et les caractéristiques hydrographiques des zones côtières et océaniques. 2009.

DURANT, J. M., D. O. HJERMANN, G. OTTERSEN AND N. C. STENSETH Climate and the match or mismatch between predator requirements and resource availability. *CLIMATE RESEARCH*, Apr 20 2007, 33(3), 271-283.

DURGHAM, H., I. SAMAR AND L. MURHAF *Seasonal Variations in Biomass and Abundance of Zooplankton in Coastal Waters of Wadi-kandil, Lattakia, Syria*. Edition ed., 2012. ISBN 0973-2667|escape}.

DURRIEU DE MADRON, X., C. GUIEU, R. SEMPÉRÉ, P. CONAN, et al. Marine ecosystems' responses to climatic and anthropogenic forcings in the Mediterranean. *Progress in Oceanography*, 2011, 91(2), 97-166.

EDWARDS, M. AND A. J. RICHARDSON Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature*, 2004, 430(7002), 881-884.

ELIAS, A. Le chevauchement de Tripoli-Saida: croissance du Mont-Liban et risque sismique. Thèse à l'Institut de Physique du Globe de Paris, Paris. 231p., 2006.

EMERY, K. O., B. C. HEEZEN AND T. D. ALLAN Bathymetry of the eastern Mediterranean Sea. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, 1966, 13, 173-192.

FAKHRI, M., J. C. ROMANO AND M. ABBOUD-ABI SAAB Impact of natural and artificial chemical inputs on the marine ecosystem of Batroun region (North Lebanon). Lebanese Science Journal, 2005, 6(1), 13-27.

FAKHRI, M., G. KHALAF, M. ABBOUD - ABI SAAB, R. MOUAWAD, et al. Résultats préliminaires de l'impact des rejets d'une usine chimique sur l'environnement marin pélagique et benthique de la côte libanaise. Lebanese Science Journal, 2011, 12(2), 33-44.

FERNÁNDEZ DE PUELLES, M., J.-M. PINOT AND J. VALENCIA Seasonal and interannual variability of zooplankton community in waters off Mallorca island (Balearic Sea, Western Mediterranean): 1994–1999. Oceanologica Acta, 2003, 26(5–6), 673-686.

FERNANDEZ DE PUELLES, M. L., F. ALEMANY AND J. JANSÁ Zooplankton time-series in the Balearic Sea (Western Mediterranean): Variability during the decade 1994–2003. Prog in Oceanogr, 2007, 74, 329-354.

FERNANDEZ DE PUELLES, M. L. AND J. C. MOLINERO North Atlantic climate control on plankton variability in the Balearic Sea, western Mediterranean. Geophysical Research Letters, 2007, 34(L04608).

FERNANDEZ DE PUELLES, M. L. AND J. C. MOLINERO Decadal changes in hydrographic and ecological time-series in the Balearic Sea (western Mediterranean), identifying links between climate and zooplankton. Ices Journal of Marine Science, 2008, 65, 311-317.

FERNANDEZ, E., F. ALVAREZ, R. ANADON, S. BARQUERO, et al. The spatial distribution of plankton communities in a Slope Water anticyclonic Oceanic eddy (SWODDY) in the southern Bay of Biscay. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, Jun 2004, 84(3), 501-517.

FONDA-UMANI, S., A. BERAN, S. PARLATO, T. ZOLLET, et al. Noctiluca scintillans MACARTNEY in the Northern Adriatic Sea: long term dynamics, relationships with temperature and eutrophication, and role in plankton food webs. Journal of Plankton Research, 2004, 26, 545–561.

FORTIER, L., D. PONTON AND M. GILBERT The match/mismatch hypothesis and the feeding success of fish larvae in ice-covered southeastern Hudson Bay. *Marine Ecology Progress Series*, 1995, 120, 11-27.

GAČIĆ, M., G. CIVITARESE, G. L. EUSEBI BORZELLI, V. KOVAČEVIĆ, et al. On the relationship between the decadal oscillations of the northern Ionian Sea and the salinity distributions in the eastern Mediterranean. *J. Geophys. Res.*, 2011, 116, C12002, doi:10.1029/2011JC007280.

GALIL, B., F. BOERO, M. CAMPBELL, J. CARLTON, et al. 'Double trouble': the expansion of the Suez Canal and marine bioinvasions in the Mediterranean Sea. *Biological Invasions*, 2015/04/01 2015, 17(4), 973-976.

GALIL, B. S., L. A. GERSHWIN, J. DOUEK AND B. RINKEVICH *Marivagia stellata* gen. et sp. nov. (Scyphozoa: Rhizostomeae: Cepheidae), another alien jellyfish from the Mediterranean coast of Israel. *Aquatic Invasions*, 2010, 5(4), 331-340.

GALLIENNE, C. P. AND D. B. ROBINS Is *Oithona* the most important copepod in the world's oceans? *Journal of Plankton Research*, December 1, 2001 2001, 23(12), 1421-1432.

GALLIENNE, C. P., D. B. ROBINS AND R. S. WOODD-WALKER Abundance, distribution and size structure of zooplankton along a 20 degrees west meridional transect of the northeast Atlantic Ocean in July. *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography*, 2001, 48(4-5), 925-949.

GARCIA-COMAS, C. Climate change and copepod size distribution: Comparison of two coastal long-term series in the Western Mediterranean The Open University of London, 2009.

GARCIA-COMAS, C. AND M. PICHERAL. Short manual to scan and process samples using the zooscan. In. *Laboratoire d'Océanologie de Villefranche-sur-Mer*, France, 2013.

GARCIA-COMAS, C., L. STEMMANN, F. IBANEZ, L. BERLINE, et al. Zooplankton long-term changes in the NW Mediterranean Sea: Decadal periodicity forced by winter hydrographic conditions related to large-scale atmospheric changes? *Journal of Marine Systems*, Sep 2011, 87(3-4), 216-226.

GASPARINI, S. PLANKTON IDENTIFIER: a software for automatic recognition of planktonic organisms. [http://www.obs-vlfr.fr/~gaspari/Plankton\\_Identifier/index.php](http://www.obs-vlfr.fr/~gaspari/Plankton_Identifier/index.php), 2007.

- GAUDY, R. AND G. CHAMPALBERT Space and time variations in zooplankton distribution south of Marseilles. *Oceanologica Acta*, Nov-Dec 1998, 21(6), 793-802.
- GAUDY, R. AND F. YOUSSEF Variations of zooplankton metabolism and feeding in the frontal area of the Alboran Sea (western Mediterranean) in winter. *Oceanologica Acta*, Apr 2003, 26(2), 179-189.
- GERIN, R., P. M. POULAIN, I. TAUPIER-LETAGE, C. MILLOT, et al. Surface circulation in the Eastern Mediterranean using drifters (2005–2007). *Ocean Science*, 2009, 5, 559-574.
- GOEDICKE, T. R. Submarine canyons on the central continental shelf of Lebanon. *The Mediterranean Sea a natural sedimentation laboratory*: Stanley 1972.
- GORSKY, G. AND P. GROSJEAN Qualitative and quantitative assessment of zooplankton samples. *GLOBEC INTERNATIONAL NEWSLETTER APRIL 2003*, 2003, 9(1).
- GORSKY, G., M. D. OHMAN, M. PICHERAL, S. GASPARINI, et al. Digital zooplankton image analysis using the ZooScan integrated system. *Journal of Plankton Research*, Mar 2010b, 32(3), 285-303.
- GOVAERT, G. AND M. NADI Clustering of contingency table and mixture model. *European Journal of Operational Research*, 2006, 183, 1055-1066.
- GREVE, W., S. PRINAGE, H. ZIDOWITZ, J. NAST, et al. On the phenology of north sea ichthyoplankton. *Ices Journal of Marine Science*, Oct 2005, 62(7), 1216-1223.
- GREVE, W., F. REINERS AND J. NAST Biocoenotic changes of the zooplankton in the German Bight: the possible effects of eutrophication and climate. *ICES Journal of Marine Science*, 1996, 53(6), 951-956.
- GROSJEAN, P., M. PICHERAL, C. WAREMBOURG AND G. GORSKY Enumeration, measurement, and identification of net zooplankton samples using the ZOOSCAN digital imaging system. *Ices Journal of Marine Science*, Jun 2004, 61(4), 518-525.
- HARRIS, R. P., P. H. WIEBE, J. LENZ, H. R. SKJODAL, et al. *Zooplankton methodology manual* London. Academic press, San Diego, 2000.
- HAYS, G. C., A. J. RICHARDSON AND C. ROBINSON Climate change and marine plankton. *TRENDS in Ecology and Evolution*, 2005, 20(6), 337-344.

- HECKMANN, L., B. DROSSEL, U. BROSE AND C. GUILL Interactive effects of body-size structure and adaptive foraging on food-web stability. *Ecology Letters*, Mar 2012, 15(3), 243-250.
- HIRST, A. G. AND R. S. LAMPITT Towards a global model of in situ weight-specific growth in marine planktonic copepods. *Marine Biology*, Sep 1998, 132(2), 247-257.
- HUGHES, L. Biological consequences of global warming: is the signal already apparent? *Trends in Ecology & Evolution*, Feb 2000, 15(2), 56-61.
- IBANEZ, F., J. M. FROMENTIN AND J. CASTEL Application of the cumulated function to the processing of chronological data in oceanography. . *Compte Rendu Académie des Sciences Serie III-Sciences de la vie-Life Sciences*, 1993, 316, 745-749.
- IGNATIADES, L., O. GOTSIS-SKRETAS, K. PAGOU AND E. KRASAKOPOULOU Diversification of phytoplankton community structure and related parameters along a large-scale longitudinal east–west transect of the Mediterranean Sea. *Journal of Plankton Research*, 2009, 31, 411-428.
- ISINIBILIR, M., A. E. KIDEYS, A. N. TARKAN AND I. N. YILMAZ Annual cycle of zooplankton abundance and species composition in Izmit Bay (the northeastern Marmara Sea). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 78(4), 739-747.
- JAMET, J. L., G. BOGÉ, S. RICHARD, C. GENYES, et al. The zooplankton community in bays of Toulon area (northwest Mediterranean Sea, France). *Hydrobiologia*, 2001, 457(1), 155-165.
- JOHNS, D. G., M. EDWARDS, W. GREVE AND A. W. G. SJOHN Increasing prevalence of the marine cladoceran *Penilia avirostris* (Dana, 1852) in the North Sea. *Helgoland Marine Research*, Oct 2005, 59(3), 214-218.
- JOHNSON, C. L., A. W. LEISING, J. A. RUNGE, E. J. H. HEAD, et al. Characteristics of *Calanus finmarchicus* dormancy patterns in the Northwest Atlantic. *Ices Journal of Marine Science*, Apr 2008, 65(3), 339-350.
- KAMBURSKA, L. AND S. FONDA-UMANI Long-term copepod dynamics in the Gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea): recent changes and trends. *CLIMATE RESEARCH*, 2006, 31(2-3), 195-203.
- KHAIR, K., N. AKER AND K. ZAHRUDDINE. MS Thesis, Merican University of Beirut, Geology Department, 19 pp. 14 pl., 1992.

- KHALAF, G. Etude physico-chimique et biocénotique du cours d'eau Antélias (Liban). Lebanese Science Research Report, 1997, 2, 3-14.
- KLEIN, B., W. ROETHER, B. B. MANCA, D. BREGANT, et al. The large deep water transient in the Eastern Mediterranean. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 1999, 46(3), 371-414.
- KOUWENBERG, J. Shift in Copepod Populations and Long-term Changes in the Northwestern Mediterranean. An Overview. Paris: 1998.
- KRESS, N., I. GERTMAN AND B. HERUT Temporal evolution of physical and chemical characteristics of the water column in the Easternmost Levantine basin (Eastern Mediterranean Sea) from 2002 to 2010. Journal of Marine Systems, 2014, 135(0), 6-13.
- KROKOS, G., D. VELAORAS, G. KORRES, L. PERIVOLIOTIS, et al. On the continuous functioning of an internal mechanism that drives the Eastern Mediterranean thermohaline circulation: The recent activation of the Aegean Sea as a dense water source area. Journal of Marine Systems, 2014, 129(0), 484-489.
- KROM, M. D., B. HERUT AND R. F. C. MANTOURA Nutrient budget for the Eastern Mediterranean: Implications for phosphorus limitation. Limnology and Oceanography, 2004, 49(5), 1582-1592.
- KROM, M. D., K. KRESS AND K. FANNING Silica cycling in the ultra-oligotrophic eastern Mediterranean Sea. Biogeosciences, 2014, 11, 4211-4223.
- KROM, M. D., N. KRESS, S. BRENNER AND L. I. GORDON Phosphorus limitation of primary productivity in the eastern Mediterranean Sea. Limnology and Oceanography, 1991, 36(3), 424-432.
- KROM, M. D., E. M. S. WOODWARD, B. HERUT, N. KRESS, et al. Nutrient cycling in the south east Levantine basin of the eastern Mediterranean: Results from a phosphorus starved system. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2005, 52(22-23), 2879-2896.
- LAKKIS, S. Contribution à la connaissance de l'écosystème néritique des eaux libanaises (méditerranée orientale). Paris VI Univ., 1982.
- LAKKIS, S. On the presence of some rare Copepods in the Levantine Basin. Crustaceana Supplement, 1984, 7, 286-304.



- LAKKIS, S. Composition, diversité et succession des copépodes planctoniques des eaux libanaises (Médit. Orientale). *Oceanologica Acta*, 1990a, 13(4), 489-502.
- LAKKIS, S. Vingt ans d'observation sur le plancton des eaux libanaises: structure et fluctuations interannuelles. *Bulletin de l'Institut Océanographique*, Monaco, No special, 1990b, 7, 51- 66.
- LAVANIEGOS, B. E. AND M. D. OHMAN Coherence of long-term variations of zooplankton in two sectors of the California Current System. *Prog Oceanogr*, 2007, 75, 42-69.
- LAZZARI, P., C. SOLIDORO, V. IBELLO, S. SALON, et al. Seasonal and inter-annual variability of plankton chlorophyll and primary production in the Mediterranean Sea: a modelling approach. *Biogeosciences*, 2012, 9(1), 217-233.
- LEJEUSNE, C., P. CHEVALDONNÉ, C. PERGENT-MARTINI, C. F. BOUDOURESQUE, et al. Climate change effects on a miniature ocean: the highly diverse, highly impacted Mediterranean Sea. *Trends in Ecology & Evolution*, 2010, 25(4), 250-260.
- LELIÈVRE, S. Identification et caractérisation des frayères hivernales en Manche Orientale et la partie sud de la Mer du Nord. Université de Nantes, 2010.
- LICANDRO, P., A. CONVERSI, F. IBANEZ AND J. JOSSI Time series analysis of interrupted longterm data set (1961-1991) of zooplankton abundance in Gulf of Maine (northern Atlantic, USA). *Oceanol. Acta*, 2001, 24, 453-466.
- LICANDRO, P. AND F. IBANEZ Changes of zooplankton communities in the Gulf of Tigullio (Ligurian Sea, western Mediterranean) from 1985 to 1995. Influence of hydroclimatic factors. *Journal of Plankton Research*, 2000, 22(12), 271-279.
- LICANDRO, P., F. IBANEZ AND M. ETIENNE Long-term fluctuations (1974-1999) of the salps *Thalia democratica* and *Salpa fusiformis* in the northwestern Mediterranean Sea: Relationships with hydroclimatic variability. *Limnology and Oceanography*, Jul 2006, 51(4), 1832-1848.
- MACKAS, D. L., S. BATTEN AND M. TRUDEL Effects on zooplankton of a warmer ocean: Recent evidence from the Northeast Pacific. *Progress in Oceanography*, 2007, 75(2), 223-252.
- MACKAS, D. L. AND G. BEAUGRAND Comparisons of zooplankton time series. *Journal of Marine Systems*, Feb 2010, 79(3-4), 286-304.
- MACKAS, D. L., W. GREVE, M. EDWARDS, S. CHIBA, et al. Changing zooplankton seasonality in a changing ocean: Comparing time series of zooplankton phenology. *Progress in Oceanography*, May-Jul 2012, 97, 31-62.

- MAGAZZÙ, G. AND F. DECEMBRINI Primary production, biomass and abundance of phototrophic picoplankton in the Mediterranean Sea: A review. *Aquatic Microbial Ecology*, 1995, 9, 97-104.
- MAKKÉ-TRABOULSI, M. La pluviométrie moyenne annuelle au Liban-Interpolation et cartographie automatique. *Lebanese Science Journal*, 2010, 11(2).
- MALANOTTE-RIZZOLI, P. AND A. HECHT Large-scale properties of the eastern Mediterranean: a review. *Oceanologica Acta*, 1988, 11, 323-335.
- MALANOTTE-RIZZOLI, P., B. B. MANCA, M. R. D'ALCALA, A. THEOCHARIS, et al. The Eastern Mediterranean in the 80s and in the 90s: the big transition in the intermediate and deep circulations. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 1999, 29(2-4), 365-395.
- MARASOVIĆ, I., Ž. NINČEVIĆ, G. KUŠPILIĆ, S. MARINOVIĆ, et al. Long-term changes of basic biological and chemical parameters at two stations in the middle Adriatic. *Journal of Sea Research*, 2005, 54(1), 3-14.
- MAZZOCCHI, M. G., E. D. CHRISTOU, I. DI CAPUA, M. L. F. DE PUELLES, et al. Temporal variability of *Centropages typicus* in the Mediterranean Sea over seasonal-to-decadal scales. *Progress in Oceanography*, 2007, 72(2-3), 214-232.
- MAZZOCCHI, M. G., E. D. CHRISTOU, N. FRAGOPOULU AND I. SIOKOUFRANGOU Mesozooplankton distribution from Sicily to Cyprus (Eastern Mediterranean) .1. General aspects. *Oceanologica Acta*, 1997, 20(3), 521-535.
- MAZZOCCHI, M. G., P. LICANDRO, L. DUBROCA, I. DI CAPUA, et al. Zooplankton associations in a Mediterranean long-term time-series. *Journal of Plankton Research*, Aug 2011, 33(8), 1163-1181.
- MAZZOCCHI, M. G., D. NERVEGNA, G. D'ELIA, I. DI CAPUA, et al. Spring mesozooplankton communities in the epipelagic Ionian Sea in relation to the Eastern Mediterranean Transient. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2003, 108(C9), 8114.
- MAZZOCCHI, M. G. AND M. RIBERA D'ALCALA Recurrent patterns in zooplankton structure and succession in a variable coastal environment. *Ices Journal of Marine Science*, 1995, 52, 679-691.

- MAZZOCCHI, M. G. AND M. RIBIERA D'ALCALÀ Recurrent Patterns in Zooplankton Structure and Succession in a Variable Coastal Environment. *Ices Journal of Marine Science*, Jun-Aug 1995, 52(3-4), 679-691.
- MILLERO, F. J. AND A. POISSON International one-atmosphere equation of state of seawater. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1981, 28(6), 625-629.
- MILLOT, C. Circulation in the Western Mediterranean Sea. *Journal of Marine Systems*, Apr 1999, 20(1-4), 423-442.
- MILLOT, C. Circulation in the Mediterranean Sea: evidences, debates and unanswered questions. *Scientia Marina*, Jun 2005, 69, 5-21.
- MILLOT, C., N. HAMAD AND I. TAUPIER-LETAGE A new hypothesis about the surface circulation in the eastern basin of the mediterranean sea. *Progress in Oceanography*, 2005, 66, 287–298.
- MILOSLAVIC, M., D. LUCIC, B. GANGAI AND I. ONOFRI Mesh size effects on mesozooplankton community structure in a semi-enclosed coastal area and surrounding sea (South Adriatic Sea). *Marine Ecology*, 2014, 35(4), 445-455.
- MOLINA-RAMÍREZ, A., C. CÁCERES, S. ROMERO-ROMERO, J. BUENO, et al. Functional differences in the allometry of the water, carbon and nitrogen content of gelatinous organisms. *Journal of Plankton Research*, May 19, 2015 2015.
- MOLINERO, J. C., F. IBANEZ, P. NIVAL, E. BUECHER, et al. North Atlantic climate and northwestern Mediterranean plankton variability. *Limnology and Oceanography*, Jul 2005, 50(4), 1213-1220.
- MOLINERO, J. C., F. IBANEZ, S. SOUISSI, E. BOSC, et al. Surface patterns of zooplankton spatial variability detected by high frequency sampling in the NW Mediterranean. Role of density fronts. *Journal of Marine Systems*, Feb 2008a, 69(3-4), 271-282.
- MOLINERO, J. C., F. IBANEZ, S. SOUISSI, E. BUECHER, et al. Climate control on the long-term anomalous changes of zooplankton communities in the Northwestern Mediterranean. *Global Change Biology*, Jan 2008b, 14(1), 11-26.
- MONTERO-SERRA, I., M. EDWARDS AND M. J. GENNER Warming shelf seas drive the subtropicalization of European pelagic fish communities. *Global Change Biology*, Jan 2015, 21(1), 144-153.

MOTODA, S. Devices of simple plankton apparatus. Memoirs. Faculty of Fisheries, Hokkaido University, 1959, 7, 73-94.

MURPHY, J. AND J. P. RILEY A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Anal. Chim. Acta, 1962, 27, 31-36.

NICHOLS, J. AND A. THOMPSON Mesh Selection of Copepodite and Nauplius Stages of 4 Calanoid Copepod Species. Journal of Plankton Research, 1991, 13, 661-671.

NINCEVIC-GLADAN, Z., M. BUZANCIC, G. KUSPILIC, B. GRBEC, et al. The response of phytoplankton community to anthropogenic pressure gradient in the coastal waters of the eastern Adriatic Sea. Ecological Indicators, Sep 2015, 56, 106-115.

NMFS-COPEPOD The global plankton database. ONLINE. Available: <http://www.st.nmfs.noaa.gov/copepod> [20-Aug-2009] 2009.

NOAA. update to data originally published in: NOAA. 2009. Sea level variations of the United States 1854–2006. NOAA Technical Report NOS CO-OPS 053. [www.tidesandcurrents.noaa.gov/publications/Tech\\_rpt\\_53.pdf](http://www.tidesandcurrents.noaa.gov/publications/Tech_rpt_53.pdf): 2015.

NOWACZYK, A., CARLOTTI F., D. THIBAUT-BOTHA AND M. PAGANO Distribution of epipelagic metazooplankton across the Mediterranean Sea during the summer BOUM cruise. Biogeosciences, 2011, 8(8), 2159-2177.

NYKJAER, L. Mediterranean Sea surface warming 1985–2006. CLIMATE RESEARCH, 2009, 39, 11-17.

OUBA, A., M. ABBOD-ABI SAAB AND L. STEMMANN Interannual variability of Zooplankton (2000-2013) in the Levantine Sea: Significant changes associated to the EMT-like event?. Journal of Marine Systems, submitted.

PANCUCCI-PAPADOPOULOU, M. A., I. SIOKOUFRANGOU, A. THEOCHARIS AND D. GEORGOPOULOS zooplankton vertical distribution in relation to the hydrology in the NW levantine and the SE Aegean Sea. Oceanologica Acta, 1992, 15(4), 365-381.

PARRY, M. *Assessment of potential effects and adaptations for climate change in Europe: the Europe Acacia project : (a concentrated action towards a comprehensive climate impacts and adaptations assessment for the European Union)*. Edition ed.: Jackson environment institute, School of environmental science, University of east Anglia, 2000.

PERRY, R. I., H. P. BATCHELDER, D. L. MACKAS, S. CHIBA, et al. Identifying global synchronies in marine zooplankton populations: issues and opportunities. *Ices Journal of Marine Science*, Jun 2004, 61(4), 445-456.

PINARDI, N. AND E. MASETTI Variability of the large scale general circulation of the Mediterranean Sea from observations and modelling: a review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, 158, 153-173.

PIONTKOVSKI, S. A., S. FONDA-UMANI, A. DE OLAZABAL AND A. D. GUBANOVA *Penilia avirostris*: Regional and Global Patterns of Seasonal Cycles. *International Journal of Oceans and Oceanography*, 2012, 6(1), 9-25.

PITTA, P., N. STAMBLER, T. TANAKA, T. ZOHARY, et al. Biological response to P addition in the Eastern Mediterranean Sea. The microbial race against time. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2005, 52(22–23), 2961-2974.

PLANNENSTIEL, M. Erlauterungen zu den bathymetrischen karten des ostlichen mittelmeeres. *Bulletin de l'Institut océanographique de Monaco*, 1960, 60.

PLATT, T. AND K. DENMAN Organization in Pelagic Ecosystem. *Helgolander Wissenschaftliche Meeresuntersuchungen*, 1977, 30(1-4), 575-581.

PLATT, T. AND K. DENMAN The structure of pelagic marine ecosystems. *Rapp. P.-V. Re'un. Cons. Int. Explor. Mer*, 1978, 173, 60-65.

POR, F. D. Lessepsian migration: the influx of Red Sea biota into the Mediterranean by way of the Suez Canal. . In *Ecological Studies* 23. New York: Springer Verlag, 1978, p. 228.

PSARRA, S., A. TSELEPIDES AND L. IGNATIADES Primary productivity in the oligotrophic Cretan Sea (NE Mediterranean): seasonal and interannual variability. *Progress in Oceanography*, 2000, 46(2-4), 187-204.

PSARRA, S., T. ZOHARY, M. D. KROM, R. F. C. MANTOURA, et al. Phytoplankton response to a Lagrangian phosphate addition in the Levantine Sea (Eastern Mediterranean). *Deep Sea Research II*, 2005, 55(22-23), 2944-2960.

PUJOL, M. I. AND G. LARNICOL Mediterranean sea eddy kinetic energy variability from 11 years of altimetric data. *Journal of Marine Systems*, 2005, 58(3–4), 121-142.

QUINONES, R., T. PLATT AND J. RODRIGUEZ Patterns of biomass-size spectra from oligotrophic waters of the Northwest Atlantic. *Progress in Oceanography*, 2003, 57, 405–427.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. [Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>: R foundation for Statistical Computing, 2010.

RAKOTOMALALA, R. TANAGRA : un logiciel gratuit pour l'enseignement et la recherche. in Actes de EGC'2005, RNTI-E-3, 2005, 2, 697-702.

RIANDEY, V. Etude de la structure de taille des populations zooplanctoniques dans différents écosystèmes marins. Apports des nouveaux appareils automatisés d'observation. Université de la Méditerranée. Université Aix Marseille II, Marseille. pp 372, 2005.

RIANDEY, V., G. CHAMPALBERT, F. CARLOTTI, I. TAUPIER-LETAGE, et al. Zooplankton distribution related to the hydrodynamic features in the Algerian Basin (western Mediterranean Sea) in summer 1997. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2005, 52(11), 2029-2048.

RIBERA D'ALCALÀ, M., F. CONVERSANO, F. CORATO, P. LICANDRO, et al. Seasonal patterns in plankton communities in a pluriannual time series at a coastal Mediterranean site (Gulf of Naples): an attempt to discern recurrences and trends. Scientia Marina (Barcelona), 2004, 68(S1).

RICCARDI, N. AND L. MARIOTTO Seasonal variations in copepod body length: a comparison between different species in the Lagoon of Venice. Aquatic Ecology, 2000, 34(3), 243-252.

RICHARDSON, A. J. AND D. S. SCHOEMAN Climate impact on plankton ecosystems in the Northeast Atlantic. Science, 2004, 305(5690), 1609-1612.

ROBINSON, A. R., M. GOLNARAGHI, W. G. LESLIE, A. ARTEGIANI, et al. The Eastern Mediterranean general circulation: features, structure and variability. Atmos. Oceans, 1991, 15, 215-240.

ROEMMICH, D. AND J. MCGOWAN CLIMATIC WARMING AND THE DECLINE OF ZOOPLANKTON IN THE CALIFORNIA CURRENT (VOL 267, PG 1324, 1995). Science, 1995, 268(5209), 352-353.

ROETHER, W., B. KLEIN, B. B. MANCA, A. THEOCHARIS, et al. Transient Eastern Mediterranean deep waters in response to the massive dense-water output of the Aegean Sea in the 1990s. Progress in Oceanography, 2007, 74(4), 540-571.

ROETHER, W., B. B. MANCA, B. KLEIN, D. BREGANT, et al. Recent Changes in Eastern Mediterranean Deep Waters. Science, 1996, 271(5247), 333-335.

- ROETHER, W. AND R. SCHLITZER Eastern Mediterranean deep water renewal on the basis of chlorofluoromethane and tritium data. *Dyn. Atmos. Oceans*, 1991, 15, 333–354.
- ROHLING, E. J., R. H. ABU-ZIED, J. S. L. CASFORD, A. HAYES, et al. The Marine Environment: Present and Past. In. in J. C. Woodward (ed.), *The Physical Geography of the Mediterranean*. Oxford University Press, Oxford, 33-67, 2009.
- ROMAGNAN, J.-B., L. LEGENDRE, L. GUIDI, J.-L. JAMET, et al. Comprehensive Model of Annual Plankton Succession Based on the Whole-477 Plankton Time Series Approach. *Plos One*, 2015, 10(3), e0119219.
- ROMAGNAN, J. B. Les communautés planctoniques des bactéries au macroplancton : dynamique temporelle en Mer Ligure et distribution dans l’océan global lors de l’expédition Tara Oceans - Approche holistique par imagerie-. Université de Nice Sophia-Antipolis, 2013.
- ROMAGNAN, J. B., L. ALDAMMAN, S. GASPARINI, P. NIVAL, et al. Zooplankton monitoring improvement: definition of taxa and size based indicators obtained from imaging systems and computer assisted recognition on a high frequency coastal time series. *Journal of Marine Systems*, submitted.
- ROMERO, E., F. PETERS, L. ARIN AND J. GUILLÉN Decreased seasonality and high variability of coastal plankton dynamics in an urban location of the NW Mediterranean. *Journal of Sea Research*, 2014, 88, 130–143.
- ROUSSENOV, V., E. STANEV, V. ARTALE AND N. PINARDI A seasonal model of the Mediterranean Sea general circulation. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100, 13515–13538.
- RUBAO, J., E. MARTIN, L. M. DAVID, A. JEFFREY, et al. Marine plankton phenology and life history in a changing climate: current research and future directions. *Journal of Plankton Research*, 2010, 32(10), 1355-1368.
- SABBAGH, N. Géologie des gisements ferifères du Liban. Thèse à la faculté des sciences de Grenoble. 137 pp., 1964.
- SAN MARTIN, E., R. P. HARRIS AND X. IRIGOIEN Latitudinal variation in plankton size spectra in the Atlantic Ocean. *Deep Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography*, 2006, 53, 1560–1572.
- SANLAVILLE, P. Etude géomorphologique de la région littorale du Liban. Publications de l’Université Libanaise, 1977.

SCHRÖDER, K., G. P. GASPARINI, M. TANGHERLINI AND M. ASTRALDI Deep and intermediate water in the western Mediterranean under the influence of the Eastern Mediterranean Transient. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(21), L21607.

SCOTTO DI CARLO, B., A. IANORA, E. FRESI AND J. HURE Vertical zonation patterns for Mediterranean copepods from the surface to 3000 m at a fixed station in the Tyrrhenian Sea. *Journal of Plankton Research*, 1984, 6, 1031-1056.

SHALTOUT, M. AND A. OMSTEDT Recent sea surface temperature trends and future scenarios for the Mediterranean Sea. *Oceanologia*, 2014 2014, 56(3), 411-443.

SIOKOU-FRANGOU, I. Zooplankton annual cycle in a Mediterranean coastal area. *Journal of Plankton Research*, 1996, 18(2), 203-223.

SIOKOU-FRANGOU, I., G. ASSIMAKOPOULOU, E. CHRISTOU, H. KONTOYIANNIS, et al. Long-term mesozooplankton variability in a Mediterranean coastal area, as influenced by trophic relationships and climate In *Proc. of the 4th Int. Zooplankton Production Symp., Human and Climate Forcing of Zooplankton Populations*. Hiroshima (Japan), 2007, p. 61.

SIOKOU-FRANGOU, I., U. CHRISTAKI, M. G. MAZZOCCHI, M. MONTRESOR, et al. Plankton in the open Mediterranean Sea: a review. *Biogeosciences*, 2010 2010, 7(5), 1543-1586.

SIOKOUFRANGOU, I., E. D. CHRISTOU, N. FRAGOPOULU AND M. G. MAZZOCCHI Mesozooplankton distribution from Sicily to Cyprus (Eastern Mediterranean) .2. Copepod assemblages. *Oceanologica Acta*, 1997, 20(3), 537-548.

SKLIRIS, N., S. SOFIANOS, A. GKANASOS, A. MANTZIAFOU, et al. Decadal scale variability of sea surface temperature in the Mediterranean Sea in relation to atmospheric variability. *Ocean Dynamics*, 2012, 62(1), 13-30.

SOGREAH Etude du débouché en mer des égouts de Beyrouth. Campagne de mesure. Conseil exécutif des grands projets de la ville de Beyrouth. Rapport No 9086, 1965.

ŠOLIC, M., N. KRSTULOVIC, I. MARASOVIC, A. BARANOVIC, et al. Analysis of time series of planktonic communities in the Adriatic Sea: distinguishing between natural and man-induced changes. *Oceanologica Acta*, 1997, 20(11).

SOUISSI, S., O. D. YAHIA-KÉFI AND M. N. DALY YAHIA Spatial characterization of nutrient dynamics in the Bay of Tunis (south-western Mediterranean) using multivariate analyses:



consequences for phyto- and zooplankton distribution. *Journal of Plankton Research*, November 1, 2000, 22(11), 2039-2059.

SOURISSEAU, M. AND F. CARLOTTI Spatial distribution of zooplankton size spectra on the French continental shelf of the Bay of Biscay during spring 2000 and 2001. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, May 20 2006, 111(C5).

SOUTHWARD, A. J., S. H. HAWKINS AND M. T. BURROWS Seventy years' observations of changes in distribution and abundance of zooplankton and intertidal organisms in the western English Channel in relation to rising sea temperature. *Journal of Thermal Biology*, 1995, 20(1/2), 127-155.

STEMMANN, L. AND E. BOSS. Plankton and Particle Size and Packaging: From Determining Optical Properties to Driving the Biological Pump. In C.A.G.S.J. CARLSON ed. *Annual Review of Marine Science*, Vol 4. 2012, vol. 4, p. 263-290.

STEMMANN, L., J. B. ROMAGNAN, L. ALDAMMAN, S. GASPARINI, et al. Zooplankton monitoring improvement: definition of taxa and size based indicators obtained from imaging systems and computer assisted recognition on a high frequency coastal time series. *Journal of Marine Systems*, submitted.

TERBIYIK KURT, T. AND S. POLAT Seasonal distribution of coastal mesozooplankton community in relation to the environmental factors in İskenderun Bay (north-east Levantine, Mediterranean Sea). *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2013, 93(05), 1163-1174.

TERBIYIK KURT, T. AND S. POLAT Zooplankton abundance, biomass, and size structure in the coastal waters of the northeastern Mediterranean Sea. *Turkish Journal of Zoology*, 2014, 38, 1-10.

THEOCHARIS, A., G. KROKOS, D. VELAORAS AND G. KORRES. An Internal Mechanism Driving the Alternation of the Eastern Mediterranean Dense/Deep Water Sources. In M.G. G.L.E. BORZELLI, P. LIONELLO, P. MALANOTTE-RIZZOLI ed. *The Mediterranean Sea: Temporal Variability and Special Patterns*. American Geophysical Union / Wiley, 2014a, p. 113-137.

THEOCHARIS, A., G. KROKOS, D. VELAORAS AND G. KORRES. An Internal Mechanism Driving the Alternation of the Eastern Mediterranean Dense/Deep Water Sources. In *The Mediterranean Sea*. John Wiley & Sons, Inc., 2014b, p. 113-137.

- THEOCHARIS, A., A. LASCARATOS AND S. SOFIANOS Variability in the sea water properties in the Ionian, Cretan and Levantine Seas during the last century, in tracking long term hydrological changes in the Mediterranean Sea. In: Briand, F. (Ed.), CIESMWorkshop Series. Mediterranean Science Committee, Monaco, 2002, 16, 71-74.
- THINGSTAD, T. F., M. D. KROM, R. F. C. MANTOURA, G. A. F. FLATEN, et al. Nature of Phosphorus Limitation in the Ultraoligotrophic Eastern Mediterranean. *Science*, 2005, 309(5737), 1068-1071.
- THINGSTAD, T. F. AND F. RASSOULZADEGAN Conceptual models for the biogeochemical role of the photic zone microbial food web, with particular reference to the Mediterranean Sea. *Progress in Oceanography*, 1999, 44(1-3), 271-286.
- TRUDNOWSKA, E., S. L. BASEDOWB AND K. BLACHOWIAK-SAMOLYK Mid-summer mesozooplankton biomass, its size distribution, and estimated production within a glacial Arctic fjord (Hornsund, Svalbard). *Journal of Marine Systems*, 2014, 137, 55-66.
- TSELEPIDES, A., V. ZERVAKIS, T. POLYCHRONAKI, R. DANOVARO, et al. Distribution of nutrients and particulate organic matter in relation to the prevailing hydrographic features of the Cretan Sea (NE Mediterranean). *Progress in Oceanography*, 2000, 46(2-4), 113-142.
- TSIMPLIS, M. N. AND S. A. JOSEY Forcing of the Mediterranean Sea by atmospheric oscillations over the North Atlantic. *Geophysical Research Letters [GEOPHYS. RES. LETT.]*, 2001, 28: doi: 10.1029/2000GL012098. issn: 0094-8276.
- TSIMPLIS, M. N., V. ZERVAKIS, S. A. JOSEY, E. L. PENEVA, et al. Chapter 4 Changes in the oceanography of the Mediterranean Sea and their link to climate variability. In P.M.-R. P.
- TURLEY, C. M. AND E. D. STUTT Depth-related cell-specific bacterial leucine incorporation rates on particles and its biogeochemical significance in the Northwest Mediterranean. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45(2), 419-425.
- TURNER, J. T. The importance of small copepods and their roles in pelagic marine food webs. *Zoological Studies*, 2004, 43, 255-266.
- UITZ, J., D. STRAMSKI, B. GENTILI, F. D'ORTENZIO, et al. Estimates of phytoplankton class-specific and total primary production in the Mediterranean Sea from satellite ocean color observations. *GLOBAL BIOGEOCHEMICAL CYCLES*, 2012, 26, 10 pp.

UTERMÖHL, H. Zur vervollkommenung des quantitative phytoplankton methodic. Mitt. Int. Ver. Limnol., 1958, 9, 1-38.

VALDES, L., A. LOPEZ-URRUTIA, J. CABAL, M. ALVAREZ-OSSORIO, et al. A decade of sampling in the Bay of Biscay: What are the zooplankton time series telling us? Progress in Oceanography, 2007, 74(2-3), 98-114.

VANDROMME, P., E. NOGUEIRA, M. HURET, A. LOPEZ-URRUTIA, et al. Spring time zooplankton size structure over the continental shelf of the Bay of Biscay. Ocean Science, 2014, 10, 821-835.

VANDROMME, P., L. STEMMANN, L. BERLINE, S. GASPARINI, et al. Zooplankton communities fluctuations from 1995 to 2005 in the Bay of Villefranche-sur-Mer (Northern Ligurian Sea, France). Biogeosciences, 2012, 8, 3143-3158.

VANDROMME, P., L. STEMMANN, L. BERLINE, S. GASPARINI, et al. Inter-annual fluctuations of zooplankton communities in the Bay of Villefranche-sur-mer from 1995 to 2005 (Northern Ligurian Sea, France). Biogeosciences, 2011, 8(11), 3143-3158.

VELAORAS, D., G. KROKOS, K. NITTIS AND A. THEOCHARIS Dense intermediate water outflow from the Cretan Sea: A salinity driven, recurrent phenomenon, connected to thermohaline circulation changes. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(8), 4797-4820.

VERGNAUD-GRAZZINI, C., A. M. BORSETTI, F. CATI, P. COLANTONI, et al. Palaeoceanographic record of the last deglaciation in the Strait of Sicily. Marine Micropaleontology, 1988, 13(1-21).

VIDJAK, O., N. BOJANIC, G. KUSPILIC, Z. N. GLADAN, et al. Zooplankton community and hydrographical properties of the neretva channel (eastern Adriatic Sea). Helgoland Marine Research, 2007, 61(4), 267-282.

WEIKERT, H., R. KOPPELMANN AND S. WIEGRATZ Evidence of episodic changes in deep-sea mesozooplankton abundance and composition in the Levantine Sea (Eastern Mediterranean). Journal of Marine Science, 2001, 30, 221-239.

WHITE, E. P., S. K. M. ERNEST, A. J. KERKHOFF AND B. J. ENQUIST Relationships between body size and abundance in ecology. Trends in Ecology & Evolution, 2007, 22(6), 323-330.

WIEBE, P. H. Functional regression equations for zooplankton displacement volume, wet weight, dry weight, and carbon. A correction. Fish. Bull., 1988, 86, 833-835.

- WOOD, E. D., F. A. J. ARMSTRONG AND F. A. RICHARDS Determination of nitrate in seawater by cadmium copper reduction to nitrite. *J. Mar. Biol. Ass. U. K.*, 1967, 47, 23-31.
- WOODWARD, G., B. EBENMAN, M. EMMERSON, J. M. MONTTOYA, et al. Body size in ecological networks. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20(7), 402-409.
- WORM, B., E. B. BARBIER, N. BEAUMONT, J. E. DUFFY, et al. Impacts of Biodiversity Loss on Ocean Ecosystem Services. *Science*, 2006, 314(5800), 787-790.
- WÜST, G. Die tiefenzirkulation des Mittelländischen Meeres in den Kernschichten des Zwischen- und des Tiefenwassers. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, 1960, 13, 105-131.
- ZENGİNER-YILMAZ, A. AND S. BEŞİKTEPE Annual variations in biochemical composition of size fractionated particulate matter and zooplankton abundance and biomass in Mersin Bay, NE Mediterranean Sea. *Journal of Marine Systems*, May 2010, 81(3), 260-271.
- ZERVAKIS, V., D. GEORGOPOULOS AND P. G. DRAKOPOULOS The role of the North Aegean in triggering the recent Eastern Mediterranean climatic changes. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2000, 105, 26103–26116.
- ZERVOUDAKI, S., T. G. NIELSEN, E. D. CHRISTOU AND I. SIOKOU-FRANGOU Zooplankton distribution and diversity in a frontal area of the Aegean Sea. *Marine Biology Research*, 2006, 2(3), 149-168.
- ZHOU, M. What determines the slope of a plankton biomass spectrum? *Journal of Plankton Research*, May 2006, 28(5), 437-448.
- ZHOU, M. AND M. E. HUNTLEY Population dynamics theory of plankton based on biomass spectra. *Marine Ecology-Progress Series*, 1997, 159, 61-73.
- ZODIATIS, G., P. DRAKOPOULOS, S. BRENNER AND S. GROOM Variability of the Cyprus warm core eddy during the CYCLOPS project. *Deep-Sea Research II*, 2005, 52, 2897–2910.

# Annexes

## Annexe 1

Les dates des sorties et les efforts durant l'échantillonnage au point B2. Les cases blanches vides représentent les mois sans échantillonnage.

Années Mois	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
1			Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ◇▶	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●
2		Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●◇	Δ●◇▶	Δ●	Δ●		Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●
3		Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●
4		Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●
5		Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●
6	Δ●◇▶		Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●	Δ●	Δ●		Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●
7	Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●▶	Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●	Δ●		Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●
8	Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●	Δ●		Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●
9	Δ●◇▶		Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●
10	Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ◇▶	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●
11	Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ◇▶	Δ●◇▶	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●
12	Δ●◇▶	Δ●◇▶		Δ●◇▶	Δ●◇▶	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●	Δ●

Δ = Filet 52 μm

● = Bouteille Niskin

▶ = Capteur Anderaa Sensor Model 3230 (température)

◇ = Capteur Anderaa Sensor Model 3230 (salinité)

**Annexe 2**

**Temporal variability of Zooplankton (2000-2013) in the Levantine Sea: Significant changes associated to the 2005-2010 EMT-like event?**

**Anthony Ouba<sup>1,3\*</sup>, Marie Abboud-Abi Saab<sup>2</sup>, Lars Stemmann<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup> *National Council for Scientific Research, National Center for Marine Sciences, P.O. Box 534, Batroun, Lebanon*

<sup>2</sup> *CNRS, UMR 7093, LOV, Observatoire Océanologique, F-06230, Villefranche-sur-Mer, France*

<sup>3</sup> *Sorbonne Universités (UPMC Univ, Paris VI), UMR 7093, LOV, Observatoire Océanologique, F-06230 Villefranche-sur-Mer, France*

\*Corresponding author: Tel: +961 6 741582/3

Fax: +961 6 741584

National Centre for Marine Sciences, P.O. Box 534, Batroun, Lebanon

E-mail address: [anthony\\_ouba@hotmail.com](mailto:anthony_ouba@hotmail.com)

**Submitted to PLOS One Journal  
On October 28<sup>th</sup>, 2015.**

## Abstract

In this study, we investigated for the first time the potential impact of environmental changes on zooplankton over a fourteen years period (2000-2013) at an offshore station in Lebanon. Samples were collected monthly and analyzed using the semi-automated system, the ZooScan. Salinity, temperature and phytoplankton cell counts data were also collected (nano. and microphytoplankton). Results showed no significant trend in the annual temperature over the years but indicated a significant warming trend during spring. Starting 2005, salinity increased in the upper layer of the Levantine basin until 2010. During the 5 years period, total zooplankton abundances significantly increased. These modifications were concomitant to the activation of Aegean Sea as a source of dense water formation as part of the “Eastern Mediterranean Transient-Like” event. The results of the present study suggested that zooplankton benefited from enhanced phytoplankton production during the well-mixed years. Changes in the phenology of some taxa were observed accordingly with a predominantly advanced peak of abundances. In conclusion, long-term changes in zooplankton abundance were related to the Levantine thermohaline circulation rather than sea surface warming. Therefore, sampling must be maintained to assess the impact of long-term climate change on zooplankton communities.

**Keywords:** Levantine, time-series, zooplankton, Eastern Mediterranean Transient-like, hydrological change.

## 1. Introduction

Zooplankton are crucial components of marine ecosystems due to their central role in marine trophic food webs and their impact on carbon cycling (1). Zooplankton communities are sensitive to climate change (2) and vulnerable to changes in circulation (3). They are able to respond rapidly to any ecosystem variability (4, 5). Long-term plankton time-series play an essential role in detecting such environmental changes (6-8). They are suitable tools in capturing the modes of population, the community structure and the changes at different temporal scales. Compared to the Pacific (9) and Atlantic Oceans (10-12), zooplankton time-series observations are limited in number for the Mediterranean Sea area (13). There are seven ongoing time-series where four are concentrated in the NW Mediterranean (14-19); two described in the Adriatic Sea (20, 21) and one in the Aegean Sea (22, 23).

Previous studies in the Western Mediterranean sea showed an association of decadal changes in zooplankton key groups and community structure in the 1980s (14, 24), early 1990s and 2000s (24, 25) in the Ligurian basin and in mid-90s in the Balearic Sea (26) with atmospheric conditions. In the coastal Aegean Sea, zooplankton decadal changes were probably triggered by changes of anthropogenic origin (23). Since the 1990s, drastic changes in the circulation of deep water masses at the eastern Mediterranean (EMed) were known as the Eastern Mediterranean Transient (EMT). The EMT is a shifting of deep waters from its usual southern Adriatic source to a new Aegean source due to a combination of exceptional meteorological and hydrological factors (27-36). This event changed the circulation from the deep layers up to the euphotic zone causing a modification in water characteristics (37). Lately, new interests revived the functioning of EMed thermohaline circulation as an anti-correlated oscillation between the Aegean and the Adriatic seas manifested almost every decade. The EMT event was represented by alternation of intense-non intense cycles of Dense Water Formation (DWF) due to internal driving mechanism (37). Starting 2004-2005, an activation of the Aegean Sea became a dense water source area. It has been detected by the salinity increase in the upper, intermediate and deep layers of the EMed (38-40). After 2010, salinity returned to its initial condition back in 2005 (38, 39). Unlike the 90s event, Krokos, Velaoras (39) defined this episode as “EMT-like” event due to an internal mechanism without any intervention of any extreme atmospheric forcing.



The EMT affected the distribution of mesozooplankton abundance and composition between the northwestern and the eastern areas of the Ionian Sea (41). In the north Adriatic Sea, Conversi, Peluso (42) noticed the arrival of new copepod species and a significant rise or decline of several key species. A remarkable increase in mesozooplankton abundance was detected by Weikert, Koppelman (43), in the deep Ierapetra basin of the Levantine Sea after the EMT onset, as well as an appearance of new copepod species with the dominance of the calanoid at the bathypelagic and the abyssopelagic depths. At the same time, total copepod abundance also increased in the eastern Saronikos Gulf (22). Lately, the Levantine basin was a site for studies of long-term change in zooplankton. Still, few data exist from episodic cruises in the open Levantine sea (41, 43-47), while zooplankton studies were restricted to analysis of seasonal variation in diversity in the Lebanese waters (48-56). Due to this lack of observation, a potential correlation between the EMT-like event and the zooplankton communities must be revised and confirmed.

Here we report a time-series that is very distinctive due to its length (14 years) and the consistency of the sampling strategy for physical and biological key variables allowing the study of the pelagic ecosystem in the EMed. In this study, we present for the first time a novel multi-parametric time-series in the Levantine basin. Therefore, the aims of the present work are (1) to have an overview on the interannual variability of the zooplankton, (2) to identify which underlying mechanism interacts probably the most with the zooplankton community in the Lebanese waters and finally (3) to assess the zooplankton variability triggered by the EMT-like event that occurred between 2005 and 2010.

## 2. Methods

### 2.1. Sampling site

The monitored station, B2 (N 34°14,856; E 35°36,067) is located at Batroun city's offshore (north Lebanon). It is almost 4 miles offshore over a bottom depth of 500 m (Fig 1). Despite this fact, it represents the open sea conditions due to the narrow continental shelf and the rapid increase in depth. This station is a part of the long-term research program carried out in this area by the National Center for Marine Sciences from 2000 to 2013. Water samples were monthly collected during the daytime (between 7:00 am and 11:00 am). The sampling frequency was homogeneous over the time. In case of sampling failure (due to technical problems or storms), the campaigns were compensated by additional samplings 1 or 2 weeks later.

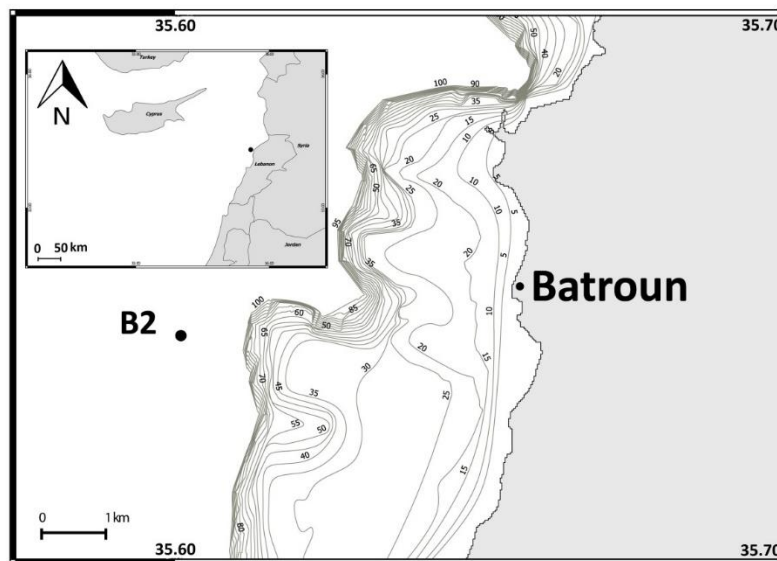


Fig 1. Location of Lebanon in the Levantine Basin, and the sampling site (Point B2) in the Lebanese waters.

### 2.2. Environmental and phytoplankton data

The environmental parameters of temperature (°C) and salinity were measured at five different depths (0, 20, 40, 60 and 80 m) using a Niskin bottle. Depth average values (0-80m depth) were used for the analysis. At each depth, the temperature was recorded with a reversing thermometer (Richter & Wiese type, 0.05 °C precision) and the salinity was determined with a

Beckman induction salinometer (model RS7-C). Water samples for phytoplankton cells count were also taken from the Niskin bottles at 0, 20, 40 and 60m depth and they were immediately preserved with lugol's solution (0.5 %). Species were counted using Utermöhl's sedimentation method (57). An initial volume of 250 ml was brought from the inverted bottle (1.7 L). No inverted filtration was carried out for the concentration, instead a volume of 100 ml of each sample were settled for 48h in a 25 mm diameter sedimentation chamber. Then, the base of the chamber was examined with a Wild M 40 phase-contrast inverted microscope. Counts were performed with 200x magnifications for cells of 20  $\mu\text{m}$  or more (microphytoplankton) and 400x magnifications for smaller cells (nanoplankton).

### 2.3. Zooplankton collection and analysis

Zooplankton samples were also collected with the same frequency from January 2000 till December 2013 at the point B2. Vertical hauls were made through the water column, from a depth of 60 m to the surface with a 40 cm opening diameter net of 52  $\mu\text{m}$  mesh size. The sampled volume of  $\sim 7.8 \text{ m}^3$  was estimated from the vertical towed height and the net opening surface ( $0.13 \text{ m}^2$ ). The net was gently rinsed and the catches were immediately transferred and preserved in formaldehyde (4%) buffered with borax (Sodium Borate) for subsequent analysis.

Samples (165 in total) were split each into two halves with the Folsom Divider. Only one half of the zooplankton samples were analyzed and digitized with the ZooScan (hydroptic v3 window 7), an imaging system developed in the Laboratory of Oceanography of Villefranche (LOV) (58). The other half was stored for long-term archiving. The ZooScan methodology is based on pattern recognition on images and it enables the count, the measure and the classification of the organisms in order to provide their numerical abundances. Each sample of this time-series was sieved on a 150  $\mu\text{m}$  mesh size to remove the smaller organisms ( $<150\mu\text{m}$ ) that cannot be detected in the ZooScan image (59). Then, each fraction was diluted with a Motoda box (60) to yield an average of  $\sim 1000$  objects in the scanning tray, in order to permit an easy manual separation of organisms overlying one another. The sub-samples were digitized at 4800 dpi resolution (each pixel was equivalent to  $5.29 \mu\text{m}^2$ ). After the scanning step, 165 raw images of digital data set in total were obtained (one image per sample). The ZooScan processing and the image acquisition of the data matrix were accomplished using the imaging software, the

ZooProcess. The automatic recognition by supervised-learning was performed by the “Plankton Identifier” (PkId) (61), based on Tanagra data mining software (62). The classification was checked and was validated manually. The learning set used for the automatic classification of object in different categories was the same one built for the zooplankton time-series in Villefranche-sur-Mer (25), in addition to some modifications in order to increase the accuracy of sorting. The plankton population was composed of 36 categories (31 zooplankton of different taxonomic groups or genera and 5 non-zooplankton including detritus and artifacts). For details on the methodology of the Zooscan integrated system, refer to Gorsky, Ohman (58). Organisms were further grouped into nineteen zooplankton categories which were unambiguously identified in all samples. Copepods were identified at genus level (*Oithona* spp, *Calanus* spp, *Corycaeus* spp, *Temora* spp and *Oncaea* spp) except the Harpacticoids according to their abundance. Two genus of the cladocerans were identified: *Penilia* and *Evadne* spp. As for the larvae, four groups were identified: Euphausiids, Echinoderms, cirripedia and nauplii, whereas the remaining groups were identified at higher taxonomic levels (appendicularians, annelids, chaetognaths, gastropods, jellyfish, thaliacea, others, siphonophores, ostracods, eggs, pteropods). The taxonomic composition of zooplankton in the Lebanese waters was described in details by Lakkis (48).

#### 2.4.Data Analysis

Graphs and analysis were performed using R Development Core Team (63) and Ocean Data Viewer (ODV). First, regularization of all time-series were made with “R” using the linear method with a delta t=30 days. The annual and the monthly mean of environmental variables were made with ODV. The Spearman rank correlation test (S) was also used to determine the statistical significance of the relationship between the variables and the time factor. In addition, Shapiro Wilk normality test was used to test the normality of the variables. The Wilcoxon rank sum test (W) was used to test the differences in zooplankton groups and genera abundances and in hydrological parameters between the saline and non-saline periods.

### 3. Results

#### 3.1.Long-term environmental variability

Sea surface temperature, showed a clear annual cycle (Fig 2) with alternating periods of high (normally in August) and low temperature (in March and February). It varied between 16.9 °C in 2004 and 31 °C in 2012. No significant trend was detected in the annual temperature but a significant warming one ( $p = 0.0334$ ) was noticed only in the spring season (the red line).

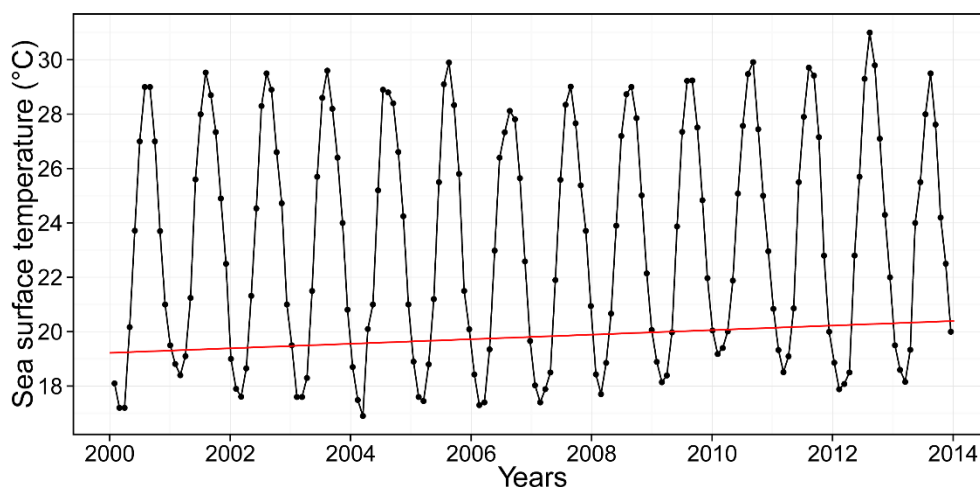


Fig 2. Temporal evolution of the sea surface temperature at B2 (2000-2013), the red line represents the general trend of sea surface temperature evolution in spring (April to June).

Annual mean temperature and salinity were calculated for the point B2 at each depth (0, 20, 40, 60 and 80 m). Temperature and salinity decreased relatively with the increasing depth (Fig 3). Temperature showed a fluctuation between 23 and 23.5 °C on the surface and reached 19 °C at 80 m depth (Fig 3A). An increase in mean temperature occurred in 2001, 2010 and 2011, whereas it decreased in the whole water column from 2004 till 2008 with a minimum sea surface temperature (SST) of 22.5 °C in 2006. These interannual changes in annual temperature remained weak compared to the change in annual salinity. For the latter, a large variability was noticed throughout this series with periods of high and low salinities (Fig 3B). The lowest salinity values were recorded between 2003 and 2005 (39.05 on the surface and 38.85 at 80 m depth). In early 2005, a clear salinity rise was remarked along the water column and pursued till 2010. It reached 39.25 at 80 m depth and peaked on the surface with values higher than 39.35. This salinity increase was almost 0.3 and decreased during 2011 and 2012 (39.15 in the surface and 39 at 80 m depth). No significant temporal trend was evident in both temperature and salinity over this time-series.

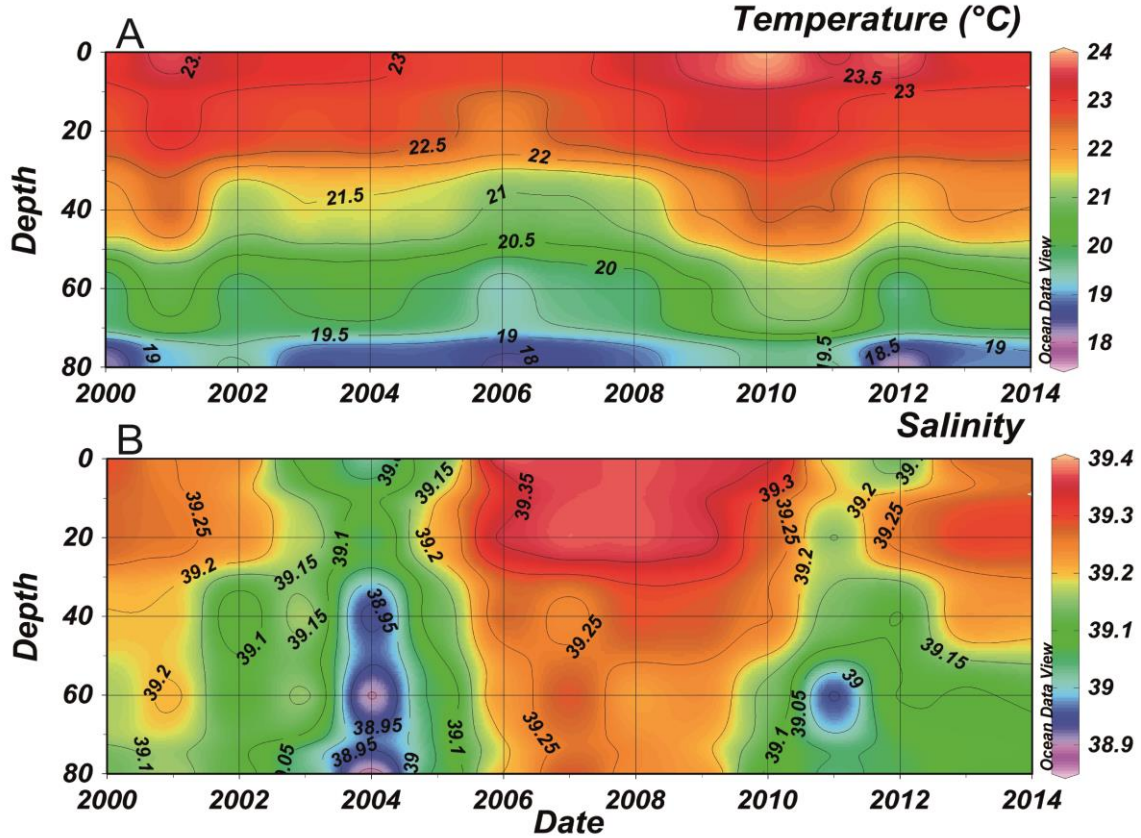


Fig 3. Temporal evolution of mean annual temperature (A) and salinity (B) along the water column at B2 between 2000 and 2013.

For further analysis, we have chosen to separate the time series into two periods relative to the salinity ( $p = 1.453 \cdot 10^{-6}$ ). The first one as a saline period (SP) corresponding to 2005-2010 and the second one as a non-saline period (NSP) corresponding to 2000-2004 and 2011-2013.

A comparison of annual cycles in physical parameters (temperature, salinity and density) between the two periods is shown in Fig 4. Temperature displayed a clear seasonality where it is characterized by 1) a homogenous mixed column from January to April where temperature is below 19 °C and 2) a stratified column for the remaining year in both periods where the temperature is higher than 27 °C at the sea surface. During winter (January-March), the observed temperature during the SP (Fig 4D) was lower, earlier (minimum of <17.5°C in February) and more homogeneous in the water column than the NSP (minimum of 17.5 °C in March) (Fig 4A). During summer (July-September), the thermocline during the SP seemed to be shallower and less stratified (above 60 m depth in July) than the NSP (below 60 m depth).

As for the salinity, a strong stratification was observed through the water column in both periods with a clear salinity rise of 0.2-0.3 for the SP (Fig 4E). A homogeneous column was noticed from February to May with a salinity ranging between 38.9 and 39 for the NSP (Fig 4B) and between 39.05 and 39.2 for the SP. Starting May, the salinity started increasing at the surface toward the depth column at both periods. Salinity peaked on the surface between September and November and reached 39.45 during the NSP, whereas it reached 39.5 between August and November during the SP.

Regarding seawater density, vertical gradients were minimum in February during winter of the SP ( $>1028$ ), one month earlier than the NSP (Fig 4C and Fig 4F). However during summer, a weaker and narrower density gradient was evident during the SP. Values of 1026 ranged between 0 and 30m depth in July-September during the SP, while they ranged between 0 and 40m depth during August of the NSP. Also, values of 1026.5 were below 40m depth during August of the SP and during July-September of the NSP.



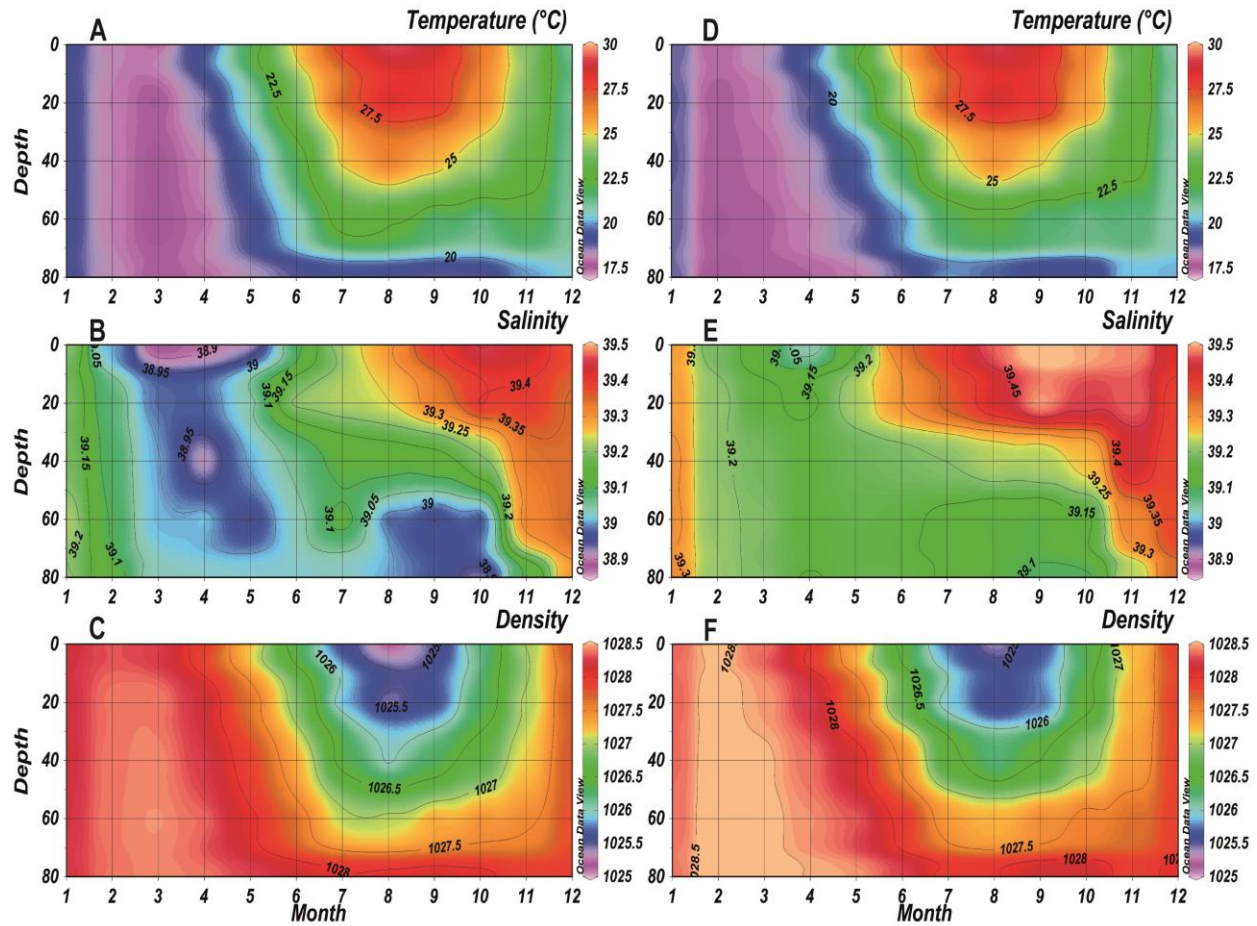


Fig 4. Monthly mean temperature, salinity and density of the NSP (A, B, C respectively) and SP (D, E, F respectively) in the water column at B2.

### 3.2. Seasonal variability of phytoplankton

The comparison in the mean annual cycle of the phytoplankton populations showed in Fig 5 the difference between the two identified periods. Regarding the nanoplankton no significant difference was detected at the annual scale between the SP and the NSP. However, a clear difference in the phenology of the two periods was detected. During the NSP, the nanoplankton population did not present a clear annual cycle in the abundances (Fig 5A). It mainly increased in the spring-early summer and mean values reached  $1.4 \cdot 10^5$  cells.L<sup>-1</sup>. In contrast, during the winter, spring and autumn of the SP, mean abundances were higher and showed peaks in February ( $1.6 \cdot 10^5$  cells.L<sup>-1</sup>), May ( $1.7 \cdot 10^5$  cells.L<sup>-1</sup>) and November ( $1.4 \cdot 10^5$  cells.L<sup>-1</sup>).

Regarding the microphytoplankton (diatoms and dinoflagellates), a significant difference was detected between the SP and the NSP ( $p=0.004898$ ). A clear seasonality was noticed in their annual cycle for both periods with a difference in the peaks' timing (Fig 5B). Mean abundances



reached the maximum of  $9.10^4$  cells.L<sup>-1</sup> in May of the NSP whereas in the SP the mean values peaked one month earlier ( $1.45.10^5$  cells.L<sup>-1</sup> in April).

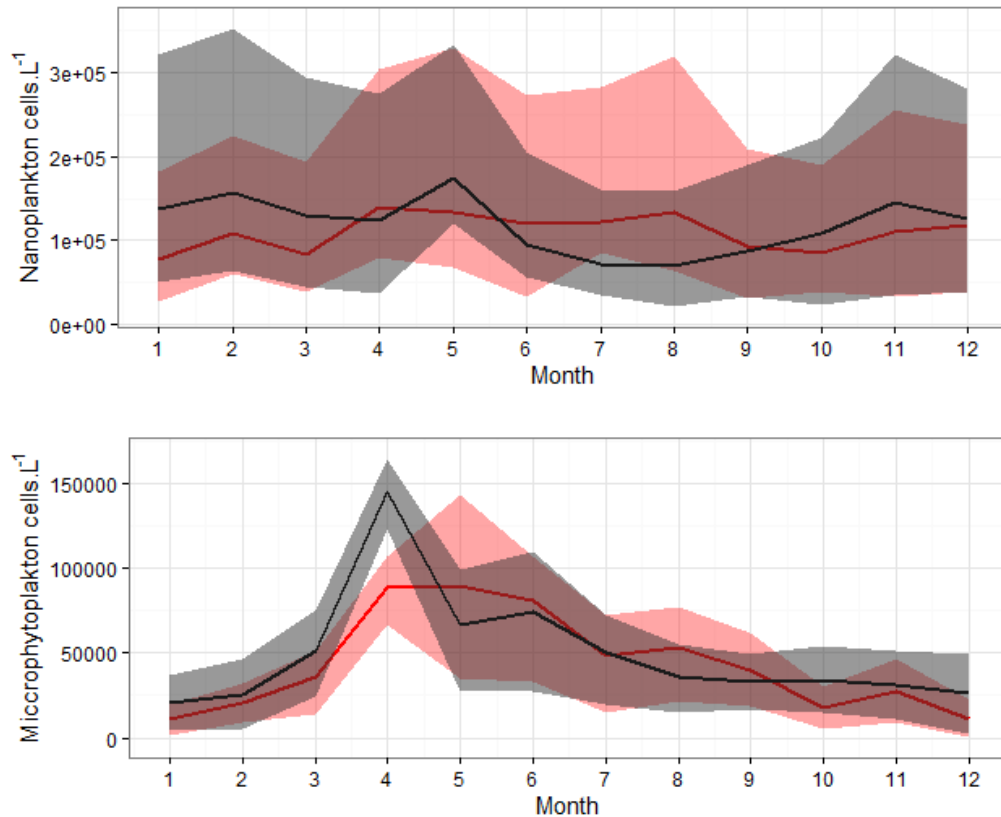


Fig 5. Annual cycle of mean abundances of the (A) Nanoplankton and (B) Microphytoplankton during SP (black) and NSP (red) with percentiles Q1 and Q3 (shaded area) at B2.

### 3.3. Interannual zooplankton variability

A total of 25 zooplankton taxa of different taxonomic level were identified in the sampling site. Descriptive statistics (mean and standard deviation) of the taxa abundances for each period were showed in Table 1. The hypothesis that showed no difference between the two periods were tested. The test results confirmed a significant increase ( $p < 0.05$ ) in abundances between the two periods for total zooplankton (44%), total copepods (47%) including the *Calanus* spp, *Acartia* spp, *Oithona* spp and *Corycaeus* spp, annelids, pteropods, gastropods, siphonophores, chaetognaths and eggs (all increasing during the SP).

Table 1. Descriptive statistics (Mean and Standard Deviation) of the identified zooplankton in the sampling site and the Wilcoxon test showing the difference between the SP and NSP between the SP and NSP in p-value order.

Groups	NSP Average $\pm$ SD (ind.m <sup>-3</sup> )	SP Average $\pm$ SD (ind.m <sup>-3</sup> )	p-value
Others	5.6 $\pm$ 5.7	5.1 $\pm$ 4.9	0.916
Euphausiacea	2.5 $\pm$ 8.9	1.3 $\pm$ 2	0.813
<i>Evadne</i> spp	13.7 $\pm$ 35.5	27.7 $\pm$ 80.8	0.721
Jellyfish	11.2 $\pm$ 13.4	11.8 $\pm$ 14.1	0.63
Appendicularians	53.3 $\pm$ 67.2	55.9 $\pm$ 61.4	0.598
Ostracods	6.9 $\pm$ 7.1	6.6 $\pm$ 7.2	0.589
Cirripedia	5.1 $\pm$ 11.5	13.2 $\pm$ 53.9	0.548
Thaliaceae	4.7 $\pm$ 9.2	12.7 $\pm$ 43.8	0.494
<i>Oncaea</i> spp	16.9 $\pm$ 15.8	22 $\pm$ 23.8	0.359
<i>Penilia</i> sp	32.2 $\pm$ 16.6	1.6 $\pm$ 6.3	0.344
<i>Temora</i> spp	23.4 $\pm$ 41.2	38.9 $\pm$ 72.9	0.336
Echinoderm	2.6 $\pm$ 6.1	3.4 $\pm$ 6.2	0.184
Harpacticoids	15.5 $\pm$ 16.3	23 $\pm$ 28.4	0.181
Nauplii	4 $\pm$ 3.8	3.7 $\pm$ 5	0.114
<i>Calanus</i> spp	31.7 $\pm$ 29.4	42.9 $\pm$ 39.8	0.022
Annelids	18.3 $\pm$ 19.3	30.1 $\pm$ 37.1	0.018
Pteropods	5.4 $\pm$ 13.7	5.5 $\pm$ 7.5	0.016
<i>Acartia</i> spp	0.8 $\pm$ 1.5	2.5 $\pm$ 4.1	0.015
<i>Oithona</i> spp	111 $\pm$ 96.2	168.1 $\pm$ 195.6	0.014
Eggs	5.4 $\pm$ 7.4	8.1 $\pm$ 7.8	0.011
<i>Corycaeus</i> spp.	28.8 $\pm$ 29.8	42.7 $\pm$ 40.9	0.004
Total zooplankton	840.5 $\pm$ 577.9	1211.8 $\pm$ 917.9	0.002
Total copepods	684.2 $\pm$ 486.3	1011.1 $\pm$ 800.6	0.001
Chaetognaths	18.2 $\pm$ 21.2	28.8 $\pm$ 30.4	0.0006
Gastropods	11.9 $\pm$ 27.1	14.2 $\pm$ 35.4	0.0001
Siphonophores	5 $\pm$ 4.7	10.5 $\pm$ 7.5	3.251.10 <sup>-7</sup>

A noticeable feature in the mean annual cycle analysis of some selected zooplankton groups is the difference in the two identified periods (Fig 6). Mean values of the siphonophores (Fig 6A), chaetognaths (Fig 6B) and copepods (Fig 6C) were clearly higher along the years of the SP, with few exceptions. During SP, siphonophores and copepods showed slight lower abundances than the NSP in April. Copepods also displayed lower values in December of the SP.

Appendicularians (Fig 6D), jellyfish (Fig 6E) and ostracods (Fig 6F) did not show any significant difference in their annual cycle between the two periods. In addition, changes in the phenology have occurred for some groups. Siphonophores, copepods and ostracods peaked in March of the SP which is one month earlier than the NSP (April) and two months for the chaetognaths (May). It is noteworthy that other peaks appeared in other seasons for siphonophores, appendicularians and copepods.

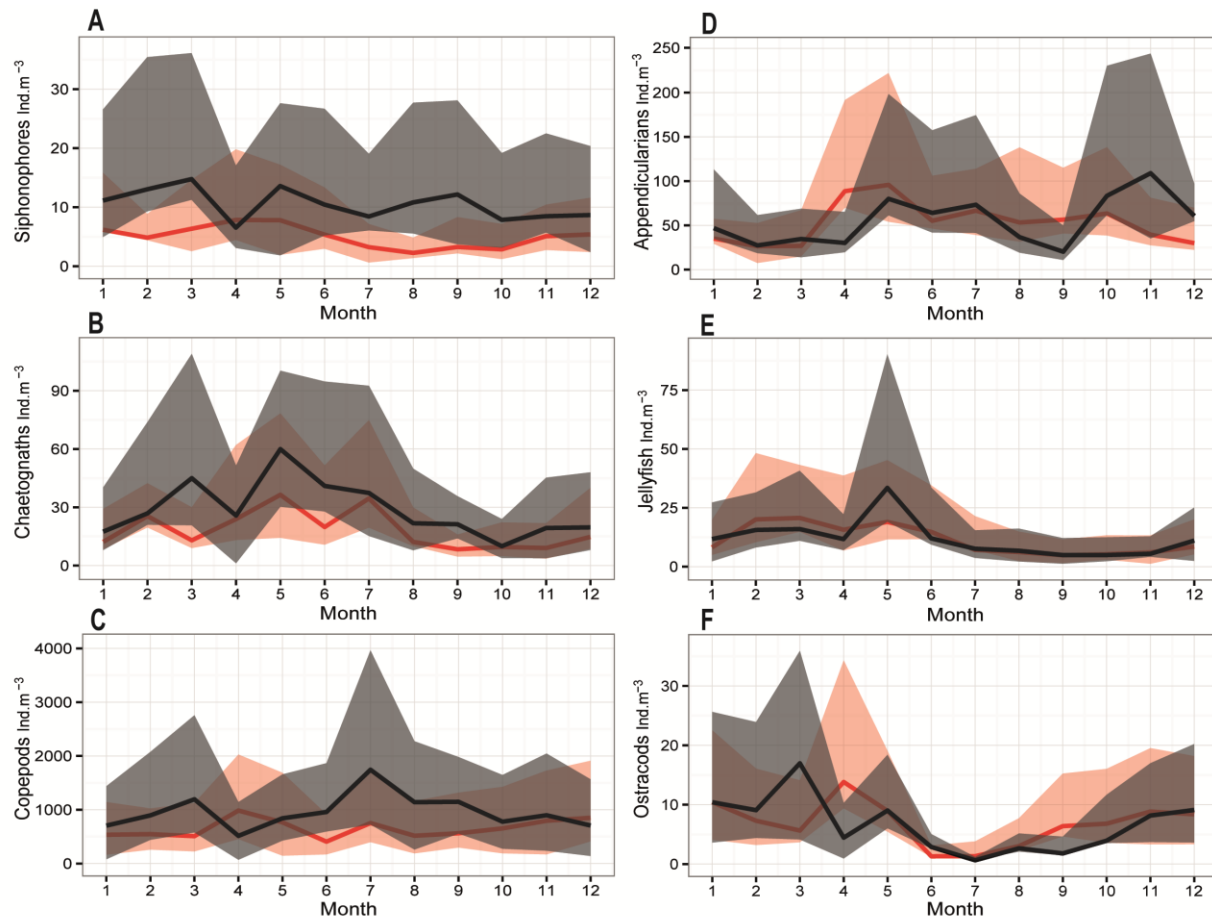


Fig 6. Annual cycle of mean abundances of the (A) Siphonophores, (B) Chaetognaths, (C) Copepods, (D) Appendicularians, (E) Jellyfish and (F) Ostracods during SP (black) and NSP (red) with percentiles Q1 and Q3 (shaded area) at B2.

Since the copepods were found to be the dominant group, they represented the majority of the enumerated organisms (~80%, data not shown). Therefore, we chose to present the difference in the annual cycles of the identified copepods between the two studied periods (Fig 7). In contrast to the *Temora* spp, *Oncaea* spp and Harpacticoids (Fig 7E, Fig 7F and Fig 7G respectively), mean values of the *Calanus* spp, *Acartia* spp, *Oithona* spp and *Corycaeus* spp (Fig

7A, Fig 7B, Fig 7C, and Fig 7D respectively) were significantly higher during the SP. An increase was noticed in the mean values along the year, except for April where abundances were lower than the NSP. Changes in the timing of the peak have been entailed for some genera. The *Oncaea* spp and *Corycaeus* spp displayed a peak (March) one month earlier in the SP than the NSP (April). While the *Oithona* spp showed a great presence in late spring-early summer thus a peak appeared (July) showing a delay of 2-3 month (April-May).

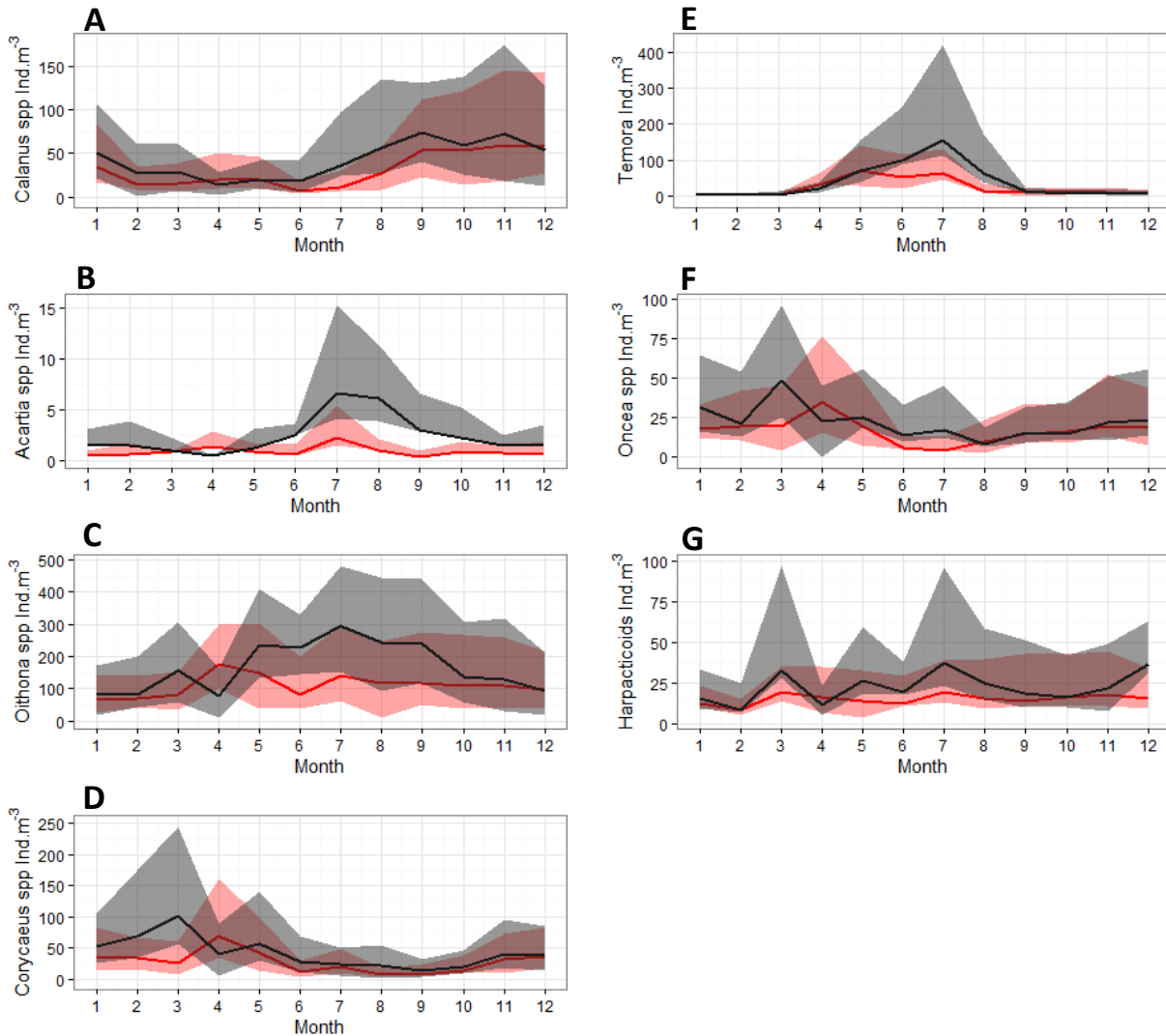


Fig 7. Annual cycle of mean abundances of the (A) *Calanus* spp, (B) *Acartia* spp, (C) *Oithona* spp, (D) *Corycaeus* spp, (E) *Temora* spp, (F) *Oncaea* spp and (G) *Harpacticoids* during SP (black) and NSP (red) with percentiles Q1 and Q3 (shaded area) at B2.

## 4. Discussion

### 4.1. The physical long-term changes

Earlier studies have shown that global warming caused the rise of the sea surface temperature in the Mediterranean. Skliris, Sofianos (64) and Shaltout and Omstedt (65) calculated a positive warming trend of  $0.042\text{ }^{\circ}\text{C.yr}^{-1}$  in the eastern sub-basin in the last three decades. Warming also has been observed in the Lebanese waters by Abboud-Abi Saab, Fakhri (66) and in the last 30 years by Lakkis (67). However in the current study, only the spring season showed a significant warming of  $0.09\text{ }^{\circ}\text{C.yr}^{-1}$  suggesting that warming effect affects mainly the spring season. Our results confirmed the study of Nykjaer (68) who noted a warming tendency in the upper layer of the EMed basin ( $0.05 \pm 0.009^{\circ}\text{C.yr}^{-1}$ ) occurring mostly from May to July in the last two decades.

The most striking result was the clear salinity increase from 39.05 to 39.35 in the upper 80 m depth from 2005 till 2010. The timing of this salinity anomaly was consistent with previous studies in the middle of the 2000s in the upper/intermediate layers in the EMed (39), in the easternmost Levantine basin (40) and in the intermediate and deep layers in the Cretan Sea (38). This salinity event was related to the changes of the EMed upper thermohaline circulation known as the *EMT-like*; it is exclusively initiated by the modification of the deep circulation in the Aegean Sea (37, 39). These reported periods are very consistent with the identified periods in the present study in term of timing. Salinity changes reflected clearly the presence of the *EMT-like* event. As a result, a new denser DWF pushed the preexisted EMed DW up to the superficial layers favoring the uplift of nutrients. Yet, this DWF was not dense enough to penetrate into the deep layers of the EMed (37-39). In 2010, a complete reversal of the Ionian upper layer circulation occurred and the North Ionian Gyre became cyclonic and favored the Adriatic Sea pre-conditioning (38). Salinity started decreasing and indicated a slow return towards the pre-*EMT-like* conditions. As well, the water mass proportions of the Eastern basin had significantly changed between 2008 and 2013 (post-*EMT-like* conditions), and therefore intermediate and deep water mass were noticeably modified (69). This physical evidence of the change in the hydrodynamics was the basis of our choice of the two period analyses: the *EMT-like* being the SP (2005-2010) and non-*EMT-like* period being the NSP (2000-2004 and 2011-2013).

#### 4.2. The plankton temporal evolution.

No significant trend was shown on neither the annual nor the spring zooplankton over the entire time period, suggesting that they were not impacted by the spring warming of sea surface temperature. Still, this time-series was not long enough to definitely come up with a result and longer time-series will be required to assess the response of zooplankton to global warming. Instead, our results pointed out to changes in abundances between the two periods related to the occurrence of the EMT-like. Total zooplankton abundance significantly increased during the EMT-like period from 2005 till 2010 by 44%. More specifically, siphonophores increased by 110%, annelids (64%), chaetognaths (58%), eggs (50%), copepods (47%) and gastropods (19%) were mainly responsible for this rise. As for copepods, *Acartia* spp, *Oithona* spp, *Corycaeus* spp and *Calanus* spp have increased by 212%, 51%, 48% and 35% respectively. For some taxa, differences were almost evident all around the EMT-like years. Higher zooplankton abundances and especially copepods also have been reported elsewhere in the EMed under saline circumstances subsequent to the EMT onset. For instance, Christou (22) related the increase in total copepod abundances early 90s in the Aegean Sea to an increase in salinity; it was related to changes in water mass during the EMT onset. Conversi, Peluso (42) also reported the increase of annual copepod abundances in the Adriatic Sea and explained this pattern by a change of circulation following the EMT event early 90s. In the Ionian Sea, *Oithona* spp along with *Corycaeus* spp and larger size chaetognaths were also observed as more abundant during the EMT onset (41). The authors related the changes in chemical characteristics to the water mass exchanges and the enrichment effects of the cyclonic circulation. These latter ones were influenced by the upward shift of the nutricline to the euphotic zone due to the EMT (36) and the interaction between the cyclonic circulation and the continental slope.

A significant increase of the phytoplankton abundances (nano. microphytoplankton) was observed during winter-early spring of the EMT-like. They also exhibited a peak earlier than the non EMT-like period. Our observations partially agreed with earlier observation off Israel coast where higher deep chlorophyll-*a* biomass were observed from 2005 till 2010 (40). In this latter study, the authors observed a nutricline uplift during these years and proposed that it sustained higher phytoplankton biomasses. However, they acknowledged the need for additional measurements in their time-series to confirm the spatial extant of their findings. In contrast to

their observations, a significant decrease in nitrate was also detected along with a significant increase of orthophosphate (data not shown). However, nutrient concentrations at the studied site may not be forced by the deep waters supply as suggested by their high concentrations in the upper 10 m of the surface layer. Total nitrites + nitrates and orthophosphates were higher than  $0.4 \mu\text{M.L}^{-1}$  and  $0.15 \mu\text{M.L}^{-1}$ , respectively (data not shown) being above the reported levels in the oligotrophic Levantine Sea (70). While Kress, Gertman (40) detected values less than  $0.2 \mu\text{M.L}^{-1}$  for the total nitrites + nitrates and  $0.05 \mu\text{M.L}^{-1}$  for the phosphates in the EMed from 2002 till 2010. Therefore, nutrients at B2 probably reflected more the continental inputs from the river and the chemical industry that exist in the region (66) than the enhanced vertical mixing during the EMT-like period. Subsequently, these nutrients data could not be used in the present study to trace nutrients supply from the deep waters. Based on Kress hypothesis, we proposed that the well-mixed winter induced more nutrients availability for phytoplankton during EMT-like years in open waters of the Levantine Sea. The abundance of herbivorous and filter feeders (gastropods, pteropods, appendicularia, ostracods, *Evadne* spp, harpacticoids, *Oncaea* spp and *Calanus* spp) increased by a factor of 1.4 (from  $96.5 \pm 69.8$  to  $136.4 \pm 119.1 \text{ ind.m}^{-3}$ ) matching the rise of carnivorous organisms such as siphonophores, annelids, *Corycaeus* spp, thaliaceae and chaetognaths, which increased by a factor of 1.6 (from  $75.1 \pm 59$  to  $124.9 \pm 107.1 \text{ ind.m}^{-3}$ ). It indicated an intense feeding activity during this period.

Changes in the phenology were detected in the nanoplankton and in several zooplankton taxa with a predominantly advanced peak during the EMT-like period, in addition to other arisen peaks later during the same year. It is worth noting that the observed increase of the nanoplankton population during the EMT-like, especially in February, probably resulted from enhanced nutrients availability; it was due to the strong mixing as revealed by the weaker stratification at this time of the year during the SP. In addition to the advantageous conditions in the water column, our results suggested an early development of the zooplankton community favored by the earlier phytoplanktonic productive season. The zooplankton probably showed the preference for a diet based on nanoplanktonic preys. Therefore, the earlier bloom of nanoplankton allowed the early development of the zooplankton communities because of the plasticity in their feeding behavior and habits (41).

We can propose, as first hypothesis that the strong mixing during EMT-*like* in the Levantine basin may cause higher primary production which ends up in zooplankton abundance. However to validate this hypothesis further investigations and supplementary measurements of other ecosystem components (microzooplankton) and rates (primary production, grazing) are required. A second hypothesis could be the transport to the coastal system of different zooplankton communities (more open waters communities) in the course of changes in surface and deep circulation that altered the Levantine Basin. For instance, Weikert, Koppelman (43) reported the occurrence of *Calanus helgolandicus* in deep Levantine Sea due to the intensified water exchange with the Aegean Sea and the upwelled deep water masses during the EMT onset. Conversi, Peluso (42) also detected the arrival of *Diaxis pygmaea* in the surface water of the Adriatic Sea during EMT possibly due to northern Adriatic expansion of this species. In our case, more zooplankton could be a result of a water mass transport from more productive regions along the pathway. Yet, the detailed procedures were not clear and the experimental evidence supporting this hypothesis is still limited. Therefore, the second hypothesis will remain enigmatic and should be verified via specific target studies.

To conclude, we have provided in this study, the first zooplankton decadal time-series in the Levantine Sea. The interannual changes that took place in the zooplankton community over the whole 2000-2013 period, appeared to be more related and driven by the EMT-*like* dynamics than the sea surface warming. Salinity seemed to be a good indicator of this event where ecological surveys can refer to. Maintaining this long-term series will provide us with a more clear perception on the underlying mechanism influencing zooplankton communities. Trophic interactions triggered by stronger nutrient inputs could explain the observed pattern. Still, transport of different zooplankton community by sea surface circulation cannot be ruled out. This work could be an inducement for further studies to better understand the functioning of the pelagic ecosystem in the Levantine basin. Finally, in the context of the global warming, further measurements for this time-series will be fundamental to assess its evolution and to evaluate the consequences of any environmental modification.



## **Acknowledgments**

We are grateful to the National Council for Scientific Research (CNRS) in Lebanon for the PhD thesis scholarship granted to Mr. Anthony OUBA. We thank the NCSM crew, especially Elie Tarek for the regular sampling in the B2 station, Milad Fakhry for the thermic profile till 2004 and Marie-Thérèse Kassab for the phytoplankton identification and counting. We also thank Amanda Elineau, Jean-Baptiste Romagnan and Corinne Desnos for their help in the zooplankton analysis and identification on the Zooscan, as well as Robin Failletaz for his contribution in the data analysis with “R” during the first stage of this work. We would also like to thank three anonymous reviewers for their helpful comments on an earlier version of this manuscript.

## References

1. Banse K. Zooplankton - Pivotal Role in the Control of Ocean Production. *ICES J Mar Sci.* 1995;52(3-4):265-77. PubMed PMID: TE368-0003 TE368: Document Delivery available.
2. Richardson AJ. In hot water: zooplankton and climate change. *ICES J Mar Sci.* 2008;65(3):279-95.
3. Lindahl O, Hernroth L. Large-scale and long-term variations in the zooplankton community of the Gullmar fjord, Sweden, in relation to advective processes. *Mar Ecol Prog Ser.* 1988;43:161-71.
4. Beaugrand G. Monitoring pelagic ecosystems using plankton indicators. *ICES J Mar Sci.* 2005 May;62(3):333-8. PubMed PMID: WOS:000228705900005.
5. Hays GC, Richardson AJ, Robinson C. Climate change and marine plankton. *TRENDS in Ecology and Evolution.* 2005;20(6):337-44.
6. Perry RI, Batchelder HP, Mackas DL, Chiba S, Durbin E, Greve W, et al. Identifying global synchronies in marine zooplankton populations: issues and opportunities. *ICES J Mar Sci.* 2004 Jun;61(4):445-56. PubMed PMID: ISI:000222322500002. English.
7. Mackas DL, Beaugrand G. Comparisons of zooplankton time series. *Journal of Marine Systems.* 2010 Feb;79(3-4):286-304. PubMed PMID: WOS:000273052800007.
8. Alheit J, Bakun A. Population Synchronies Within and Between Ocean Basins: Apparent Teleconnections and Implications as to Physical-Biological Linkage Mechanisms. *Journal of Marine System.* 2010;79:267-85.
9. Lavaniegos BE, Ohman MD. Coherence of long-term variations of zooplankton in two sectors of the California Current System. *Prog Oceanogr.* 2007;75:42-69.
10. Licandro P, Conversi A, Ibanez F, Jossi J. Time series analysis of interrupted longterm data set (1961-1991) of zooplankton abundance in Gulf of Maine (northern Atlantic, USA). *Oceanol Acta.* 2001; 24:453-66.
11. Beaugrand G, Reid PC, Ibanez F, Lindley JA, Edwards M. Reorganization of North Atlantic marine copepod biodiversity and climate. *Science.* 2002 May;296(5573):1692-4. PubMed PMID: WOS:000175976200060.
12. David V, Sautour B, Chardy P, Leconte M. Long-term changes of zooplankton variability in a turbid environment: The Gironde estuary (France). *Estuar Co She Sc.* 2005;64(2-3):171-84.
13. Berline L, Siokou-Frangou L, Marasovic I, Vidjak O, de Puellès MLF, Mazzocchi MG, et al. Intercomparison of six Mediterranean zooplankton time series. *Prog Oceanogr.* 2012 May-Jul;97:76-91. PubMed PMID: WOS:000303958000005. English.
14. Molinero JC, Ibanez F, Souissi S, Buecher E, Dallot S, Nival P. Climate control on the long-term anomalous changes of zooplankton communities in the Northwestern Mediterranean. *Glob Chang Biol.* 2008 Jan;14(1):11-26. PubMed PMID: ISI:000251415000002. English.
15. García-Comas C, Stemmann L, Ibanez F, Berline L, Mazzocchi MG, Gasparini S, et al. Zooplankton long-term changes in the NW Mediterranean Sea: Decadal periodicity forced by winter hydrographic conditions related to large-scale atmospheric changes? *J Mar Sys.* 2011;87:216-26.
16. Mazzocchi MG, Christou ED, Di Capua I, de Puellès MLF, Fonda-Umani S, Molinero JC, et al. Temporal variability of *Centropages typicus* in the Mediterranean Sea over seasonal-to-decadal scales. *Prog Oceanogr.* 2007;72(2-3):214-32. PubMed PMID: ISI:000245531900008. English.

17. Mazzocchi MG, Licandro P, Dubroca L, Di Capua I, Saggiomo V. Zooplankton associations in a Mediterranean long-term time-series. *J Plankton Res.* 2011 Aug;33(8):1163-81. PubMed PMID: WOS:000292566100002.
18. Fernandez de Puelles ML, Molinero JC. North Atlantic climate control on plankton variability in the Balearic Sea, western Mediterranean. *Geophys Res Lett.* 2007;34(L04608).
19. Fernandez de Puelles ML, Alemany F, Jansa J. Zooplankton time-series in the Balearic Sea (Western Mediterranean): Variability during the decade 1994–2003. *Prog Oceanogr.* 2007;74:329-54.
20. Kamburska L, Fonda-Umani S. Long-term copepod dynamics in the Gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea): recent changes and trends. *Clim Res.* 2006;31(2-3):195-203.
21. Marasović I, Ninčević Ž, Kušpilić G, Marinović S, Marinov S. Long-term changes of basic biological and chemical parameters at two stations in the middle Adriatic. *J Sea Res.* 2005;54(1):3-14.
22. Christou ED. Interannual variability of copepods in a Mediterranean coastal area (Saronikos Gulf, Aegean Sea). *Journal of Marine Systems.* 1998;15:523-32.
23. Siokou-Frangou I, Assimakopoulou G, Christou E, Kontoyiannis H, Pagou K, Pavlidou A, et al., editors. Long-term mesozooplankton variability in a Mediterranean coastal area, as influenced by trophic relationships and climate Proc of the 4th Int Zooplankton Production Symp, Human and Climate Forcing of Zooplankton Populations; 2007; Hiroshima (Japan).
24. Garcia-Comas C, Stemann L, Ibanez F, Berline L, Mazzocchi MG, Gasparini S, et al. Zooplankton long-term changes in the NW Mediterranean Sea: Decadal periodicity forced by winter hydrographic conditions related to large-scale atmospheric changes? *Journal of Marine Systems.* 2011 Sep;87(3-4):216-26. PubMed PMID: WOS:000291845300005. English.
25. Vandromme P, Stemann L, Berline L, Gasparini S, Mousseau L, Prejger F, et al. Inter-annual fluctuations of zooplankton communities in the Bay of Villefranche-sur-mer from 1995 to 2005 (Northern Ligurian Sea, France). *Biogeosci.* 2011;8(11):3143-58. PubMed PMID: WOS:000298132200004. English.
26. Fernandez de Puelles ML, Molinero JC. Decadal changes in hydrographic and ecological time-series in the Balearic Sea (western Mediterranean), identifying links between climate and zooplankton. *ICES J Mar Sci.* 2008;65:311-7.
27. Roether W, Klein B, Manca BB, Theocharis A, Kioroglou S. Transient Eastern Mediterranean deep waters in response to the massive dense-water output of the Aegean Sea in the 1990s. *Prog Oceanogr.* 2007;74(4):540-71.
28. Roether W, Manca BB, Klein B, Bregant D, Georgopoulos D, Beitzel V, et al. Recent Changes in Eastern Mediterranean Deep Waters. *Science.* 1996;271(5247):333-5.
29. Leslie WG, Robinson AR, Theocharis A, Lascaratos A. Mediterranean Sea Circulation. In: Steele JH, Thorpe SA, Turekian KK, editors. *Ocean Currents: A Derivative of the Encyclopedia of Ocean Sciences*: Accademic Press; 2001. p. 283-302.
30. Malanotte-Rizzoli P, Manca BB, d'Alcala MR, Theocharis A, Brenner S, Budillon G, et al. The Eastern Mediterranean in the 80s and in the 90s: the big transition in the intermediate and deep circulations. *Dynam Atmos Ocean.* 1999;29(2-4):365-95.
31. Malanotte-Rizzoli P, Manca BB, Marullo S, Ribera d' Alcala M, Roether W, Theocharis A, et al. The Levantine Intermediate Water Experiment (LIWEX) Group: Levantine basin—A laboratory for multiple water mass formation processes. *Journal of Geophysical Research: Oceans.* 2003;108(C9):8101.

32. Millot C. Circulation in the Mediterranean Sea: evidences, debates and unanswered questions. *Sci Mar*. 2005 Jun;69:5-21. PubMed PMID: WOS:000229942800002.
33. Schroeder K, Josey SA, Herrmann M, Grignon L, Gasparini GP, Bryden HL. Abrupt warming and salting of the Western Mediterranean Deep Water after 2005: Atmospheric forcings and lateral advection. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2010;115(C8):C08029.
34. Bergamasco A, Malanotte-Rizzoli P. The circulation of the Mediterranean Sea: a historical review of experimental investigations. *AIOL*. 2010 2010/06/01;1(1):11-28.
35. Schröder K, Gasparini GP, Tangherlini M, Astraldi M. Deep and intermediate water in the western Mediterranean under the influence of the Eastern Mediterranean Transient. *Geophys Res Lett*. 2006;33(21):L21607.
36. Klein B, Roether W, Manca BB, Bregant D, Beitzel V, Kovacevic V, et al. The large deep water transient in the Eastern Mediterranean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 1999;46(3):371-414.
37. Theocharis A, Krokos G, Velaoras D, Korres G. An Internal Mechanism Driving the Alternation of the Eastern Mediterranean Dense/Deep Water Sources. In: G.L.E. Borzelli MG, P. Lionello, P. Malanotte-Rizzoli, editor. *The Mediterranean Sea: Temporal Variability and Special Patterns*. Geophysical Monograph Series ed: American Geophysical Union / Wiley; 2014. p. 113-37.
38. Velaoras D, Krokos G, Nittis K, Theocharis A. Dense intermediate water outflow from the Cretan Sea: A salinity driven, recurrent phenomenon, connected to thermohaline circulation changes. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2014;119(8):4797-820.
39. Krokos G, Velaoras D, Korres G, Perivoliotis L, Theocharis A. On the continuous functioning of an internal mechanism that drives the Eastern Mediterranean thermohaline circulation: The recent activation of the Aegean Sea as a dense water source area. *Journal of Marine Systems*. 2014;129(0):484-9.
40. Kress N, Gertman I, Herut B. Temporal evolution of physical and chemical characteristics of the water column in the Easternmost Levantine basin (Eastern Mediterranean Sea) from 2002 to 2010. *Journal of Marine Systems*. 2014;135(0):6-13.
41. Mazzocchi MG, Nervegna D, D'Elia G, Di Capua I, Aguzzi L, Boldrin A. Spring mesozooplankton communities in the epipelagic Ionian Sea in relation to the Eastern Mediterranean Transient. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2003;108(C9):8114.
42. Conversi A, Peluso T, Fonda-Umani S. Gulf of Trieste: A changing ecosystem. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2009;114(C3):C03S90.
43. Weikert H, Koppelman R, Wiegratz S. Evidence of episodic changes in deep-sea mesozooplankton abundance and composition in the Levantine Sea (Eastern Mediterranean). *Journal of Marine Science*. 2001;30:221-39.
44. The POEM Group. General circulation of the eastern Mediterranean *Earth Sci Rev*. 1992;285-309.
45. Siokou-Frangou I, Christou ED, Fragopoulou N, Mazzocchi MG. Mesozooplankton distribution from Sicily to Cyprus (Eastern Mediterranean): II. Copepod assemblages. *Oceanol Acta*. 1997;20(3):537-48.
46. Koppelman R, Weikert H. Spatial and temporal distribution patterns of deep-sea mesozooplankton in the eastern Mediterranean - indications of a climatically induced shift? *Marine Ecology-an Evolutionary Perspective*. 2007 Jun;28(2):259-75. PubMed PMID: WOS:000247313200003.

47. Nowaczyk A, Carlotti F., Thibault-Botha D, Pagano M. Distribution of epipelagic metazooplankton across the Mediterranean Sea during the summer BOUM cruise. *Biogeosci.* 2011;8(8):2159-77.
48. Lakkis S. Contribution à la connaissance de l'écosystème néritique des eaux libanaises (Méditerranée orientale): Paris VI Univ.; 1982.
49. Abboud-Abi Saab M. Contribution à l'étude des populations microplanctoniques des eaux côtières libanaises (Méditerranée Orientale): Univ. Aix-Marseille II; 1985.
50. Abboud-Abi Saab M. Etude quantitative et qualitative des Actinopodes (Actinopoda) dans les eaux côtières libanaises (Méditerranée Orientale). *Ann Inst Océanogr.* 1988;64(1):65-74.
51. Abboud-Abi Saab M. Variations in planktonic Foraminifera concentrations along the coastline of Lebanon. *Leb Sci Bull.* 1993;6(1):25-32.
52. Lakkis S, Zeidane R. Larves de Crustacés Décapodes des eaux côtières libanaises. Composition, Diversité et Cycle annuel. *Leb Sci Bull.* 1988;4(2):5-33.
53. Lakkis S. Composition, diversité et succession des copépodes planctoniques des eaux libanaises (Médit. Orientale). *Oceanol Acta.* 1990;13(4):489-502.
54. Lakkis S, Zeidane R. Les Amphipodes Hypériens des eaux libanaises Composition et Distribution. 1992.
55. Lakkis S, Zeidane R, editors. Distribution of Siphonophora in Lebanese waters (East Mediterranean). Proceeding of the 6th International Conference Coelenterate Biology 1995; 1997.
56. Abboud-Abi Saab M. Tintinnids of the Lebanese Coastal Waters (Eastern Mediterranean). CNRS-Lebanon/UNEP/MAP/RAC/SPA2008. 192 p.
57. Utermöhl H. Zur vervollkommenung des quantitative phytoplankton methodic. *Mitt Int Ver Limnol.* 1958;9:1-38.
58. Gorsky G, Ohman MD, Picheral M, Gasparini S, Stemmann L, Romagnan J-B, et al. Digital zooplankton image analysis using the ZooScan integrated system. *J Plankton Res.* 2010 Mar;32(3):285-303. PubMed PMID: WOS:000274339900003.
59. Gorsky G, Ohman MD, Picheral M, Gasparini S, Stemmann L, Romagnan JB, et al. Digital zooplankton image analysis using the ZooScan integrated system. *J Plankton Res.* 2010 Mar;32(3):285-303. PubMed PMID: ISI:000274339900003. English.
60. Motoda S. Devices of simple plankton apparatus. *Memoirs. Faculty of Fisheries, Hokkaido University.* 1959;7:73-94.
61. Gasparini S. PLANKTON IDENTIFIER: a software for automatic recognition of planktonic organisms. [http://www.obs-vlfr.fr/~gaspari/Plankton\\_Identifier/index.php](http://www.obs-vlfr.fr/~gaspari/Plankton_Identifier/index.php). 2007.
62. Rakotomalala R. TANAGRA : un logiciel gratuit pour l'enseignement et la recherche. in *Actes de EGC'2005, RNTI-E-3.* 2005;2:697-702.
63. R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>: R foundation for Statistical Computing; 2010.
64. Skliris N, Sofianos S, Gkanasos A, Mantziafou A, Vervatis V, Axaopoulos P, et al. Decadal scale variability of sea surface temperature in the Mediterranean Sea in relation to atmospheric variability. *Ocean Dynamics.* 2011;62:13-30.
65. Shaltout M, Omstedt A. Recent sea surface temperature trends and future scenarios for the Mediterranean Sea. *Oceanologia.* 2014 2014;56(3):411-43. PubMed PMID: WOS:000338691100001.

66. Abboud-Abi Saab M, Fakhri M, Kassab MT, Matar N, editors. Effect of distance from the coast on phytoplanktonic populations in Lebanese coastal waters during 2008-2009. INOC-Tischreen University, International conference on Biodiversity of the Aquatic Environment; 2010; Tischreen University, Syria.
67. Lakkis S. Le zooplancton marin du Liban (Méditerranée orientale), Biologie, Biodiversité, Biogéographie. Septembre 2013 ed. Italy2013. 562p p.
68. Nykjaer L. Mediterranean Sea surface warming 1985–2006. *Clim Res.* 2009;39:11-7.
69. Hassoun AER, Guglielmi V, Gemayel E, Goyet C, Abboud-Abi Saab M, Giani M, et al. Is the Mediterranean Sea Circulation in a Steady State. *J Water Res Ocean Sci.* 2015;4(1):6-17.
70. Krom MD, Kress N, Brenner S, Gordon LI. Phosphorus limitation of primary productivity in the eastern Mediterranean Sea. *Limnology and Oceanography.* 1991;36(3):424-32.

## Table des illustrations

Figure 1 : La circulation de l'eau de surface dans le Méditerranée (Vergnaud-Grazzini et al. (1988) et Roussenov et al. (1995)) modifiée par Rohling et al. (2009). Les zones ombrées indiquent la formation des eaux intermédiaires et des eaux profondes. ....	12
Figure 2 : Circulation thermohaline dans la mer Méditerranée (Tsimplis et al. (2006) modifiée par Bergamasco and Malanotte-Rizzoli (2010)) A) avant et B) durant l'Eastern Mediterranean Transient (EMT) .....	14
Figure 3 : Carte représentative des séries temporelles du zooplancton existantes dans la mer Méditerranée (selon NMFS-COPEPOD (2009)) .....	16
Figure 4 : Carte qui représente le site d'échantillonnage B2 dans la région de Batroun, Liban.....	26
Figure 5 : Filet 52 microns.....	27
Figure 6 : Relation linéaire entre les estimateurs. (A) température (°C) mesurée par le thermomètre renversé (axes des x) et celle mesurée par le CTD (axes des y), (B) salinité mesurée par le salinomètre (axes des x) et celle mesurée par le CTD (axes des y). Les paramètres chaque régression linéaire ( $\pm$ intervalle de confiance) sont présentés. Chaque point correspond à une mesure. ....	29
Figure 7: Zooscan de type (hydroptic V3 window 7).....	32
Figure 8: Série d'échantillons de dix ans collectée à Batroun.....	32
Figure 9: Boîte de Motoda .....	33
Figure 10 : Schéma résumant les différentes étapes de la préparation d'un échantillon avant sa numérisation à l'aide du Zooscan .....	34
Figure 11 : Schéma résumant les différentes étapes de la numérisation d'un échantillon à l'aide du Zooscan .....	37
Figure 12 : Metadata de la fraction d1 de la série temporelle. <b>A)</b> Latitude, <b>B)</b> Longitude, <b>C)</b> profondeur, <b>D)</b> Nombre de pêche, <b>E)</b> Type du filet (3= filet vertical), <b>F)</b> taille de la maille, <b>G)</b> aire du filet, <b>H)</b> profondeur maximale de l'échantillonnage, <b>I)</b> profondeur minimale de l'échantillonnage, <b>J)</b> Volume filtré.....	40
Figure 13: Nombre des objets scannés de la fraction d1 pour toute la série temporelle au point B2.	41
Figure 14: A) Série des abondances ( $\text{ind.m}^{-3}$ ), B) des biovolumes total ( $\text{mm}^3/\text{m}^3$ ) et C) des spectres de taille du zooplancton total. ....	42
Figure 15 : Concentrations des individus zooplanctoniques dans la fraction d1 et d1+d2 des échantillons scannés au Zooscan de l'année 1999 jusqu'à 2004. ....	43
Figure 16: Histogramme représentant la fréquence du groupe des multiples dans la série temporelle au point B2. ....	44
Figure 17 : Régularisation d'une série temporelle de l'abondance d'un taxon ( $\text{ind.m}^{-3}$ ). La série originale est en noir, la nouvelle série prédite est en rouge. Les croix représentent la série originale des données et les ronds correspondent aux points forts prédits .....	48
Figure 18: Cycle annuel de la Température de l'air (°C) au point B2 (2000-2012) (modifiée de Abboud-Abi Saab et al. (2013))......	53
Figure 19: Cycle annuel de la précipitation (mm) à Batroun (issue de <a href="http://www.weather-and-climate.com/">http://www.weather-and-climate.com/</a> ). ....	54
<b>Figure 20</b> : Cycle annuel de la température (°C) (A) dans la colonne d'eau et (B) de la moyenne des profondeurs au point B2 (2000-2013).....	55

Figure 21 : Cycle annuel de la salinité (A) dans la colonne d'eau et (B) de la moyenne des profondeurs au point B2 (2000-2013).....	56
Figure 22 : Cycle annuel de la densité (A) dans la colonne d'eau et (B) de la moyenne des profondeurs représentée par une boîte à moustache au point B2 (2000-2013).....	57
Figure 23 : Boîte à moustache représentant le cycle annuel de l'indice de stabilité en $\text{kg.m}^{-2}$ entre la surface et 60 m au point B2 (2000-2013). ....	58
Figure 24: Cycle annuel des nitrates ( $\mu\text{M.L}^{-1}$ ) (A) dans la colonne d'eau et (B) de la moyenne des profondeurs au point B2 (2000-2013).....	59
Figure 25 : Cycle annuel des nitrites ( $\mu\text{M.L}^{-1}$ ) (A) dans la colonne d'eau et (B) de la moyenne des profondeurs au point B2 (2000-2013).....	60
Figure 26 : Cycle annuel des orthophosphates ( $\mu\text{M.L}^{-1}$ ) (A) dans la colonne d'eau et (B) de la moyenne des profondeurs au point B2 (2000-2013).....	61
Figure 27 : Cycle annuel de la chlorophylle- <i>a</i> ( $\text{mg.m}^{-3}$ ) satellitaire à la surface d'eau au point B2 (2000-2013). Les valeurs aberrantes du mois de mars et avril ne sont pas présentées et dépassent la limite de l'axe.....	62
Figure 28: Cycle annuel des abondances moyennes du phytoplancton total ( $\text{Cellules.L}^{-1}$ ) au point B2 (2000-2013). La ligne centrale représente la moyenne et les zones ombrées représentent les quartiles Q1 et Q3. L'année 2012 est exclue de cette analyse.....	63
Figure 29 : Cycle annuel des abondances moyennes des principaux groupes phytoplanctoniques ( $\text{Cellules.L}^{-1}$ ) au point B2 (2000-2013). La ligne centrale représente la moyenne et les zones ombrées représentent les quartiles Q1 et Q3. L'année 2012 est exclue de cette analyse. ....	64
Figure 30 : Abondance relative moyenne (A) des copépodes et des autres zooplanctontes, (B) des différents groupes des copépodes et (C) des différents autres groupes zooplanctoniques identifiés au point B2 (2000-2013). Les valeurs sont exprimées en %. ....	65
Figure 31 : Biovolume (A) des copépodes et des autres zooplanctontes, (B) des différents groupes des copépodes et (C) des différents autres groupes zooplanctoniques identifiés au point B2 (2000-2013). Les valeurs sont exprimées en %. ....	67
Figure 32 : Cycle annuel (A) de l'abondance et (B) du biovolume moyens du zooplankton total point B2 (2000-2013). La ligne centrale représente la moyenne et les zones ombrées représentent les quartiles Q1 et Q3. ....	68
Figure 33: Cycle annuel des abondances moyennes ( $\text{Ind.m}^{-3}$ ) des différents taxa zooplanctoniques au point B2 (2000-2013).....	70
Figure 34 : Cycle annuel des biovolumes moyens ( $\text{mm}^3.\text{m}^{-3}$ ) des différents taxa zooplanctoniques au point B2 (2000-2013).....	73
Figure 35 : ACC réalisé sur toute la série zooplanctonique et hydrobiologique en fonction des saisons. En rouge sont représentés les différents taxa, et en bleu, les paramètres physico-chimiques et les saisons. L'axe 1 représente 38.2% et l'axe 2 représente 17.74 % de la variabilité. Les abréviations utilisées sur le graphique sont : <b>Stra</b> : stratification, <b>Sal</b> : salinité, <b>Temp</b> : température, <b>Dens</b> : densité, <b>Thal</b> : thaliacés, <b>Pte</b> : ptéropodes, <b>Ech</b> : larves des échinodermes, <b>Med</b> : méduses, <b>Chae</b> : chaetognathes, <b>Lima</b> : <i>Limacina</i> spp, <b>Evad</b> : <i>Evadne</i> spp, <b>Penil</b> : <i>Penilia</i> sp, <b>Fora</b> : foraminifères, <b>App</b> : appendiculaires, <b>Ndcrust</b> : crustacés indéterminés, <b>Ann</b> : annélides, <b>Nau</b> : larves nauplii, <b>Siph</b> : siphonophores, <b>Euph</b> : larves euphausiacés, <b>Cirr</b> : larves cirripèdes, <b>Ostr</b> : ostracodes, <b>Egg</b> : œufs, <b>Other</b> : autres zooplancton non identifiés, <b>CopTem</b> : <i>Temora</i> spp, <b>CopOith</b> : <i>Oithona</i> spp, <b>CopHar</b> : harpacticoïdes, <b>CopCal</b> : <i>Calanus</i> spp, <b>CopOnc</b> : <i>Oncaea</i> spp, <b>CopCory</b> : <i>Corycaeus</i> spp, <b>CopAcar</b> : <i>Acartia</i> spp, <b>NDCop</b> : copépodes indéterminés. ....	82



Figure 36 : A) Carte représentant le mode 1 de l'analyse en composantes principales de la température (ACP) et B) la première composante principale de la température de surface du bassin Levantin dans la Méditerranée orientale entre 2003 et 2014 (selon Delpech (2015)).	86
Figure 37 : A) Carte représentant le mode 1 de l'analyse en composantes principales (ACP) et B) la première composante principale de la salinité à la surface du bassin Levantin dans la Méditerranée orientale entre 2003 et 2014 (selon Delpech (2015)).	87
Figure 38 : A) Carte représentant le mode 2 de l'analyse en composantes principales (ACP) et B) la première composante principale de la salinité à la surface du bassin Levantin dans la Méditerranée orientale entre 2003 et 2014 (selon Delpech (2015)).	87
Figure 39: A) Carte représentant le mode 1 de l'analyse en composantes principales (ACP) et B) la première composante principale de la distribution spatiale de la chlorophylle- <i>a</i> issue de l'analyse d'images satellitaires MODIS au niveau du bassin Levantin dans la Méditerranée orientale entre 2003 et 2014 (selon Delpech (2015)).	88
Figure 40 : Précipitations (A) en moyenne mensuelle (ligne noire) et moyenne annuelle mobile (ligne rouge); (B) variabilité interannuelle et saisonnière, les cases blanches représentent les mois sans valeurs ; (C) déviation de la moyenne annuelle par rapport à la moyenne de la série, normalisée par l'écart-type de la série temporelle à Batroun (2003-2013).	90
Figure 41 : Vitesse du vent (A) en moyenne mensuelle (ligne noire) et moyenne annuelle mobile (ligne rouge); (B) variabilité interannuelle et saisonnière, les cases blanches représentent les mois sans valeurs ; (C) déviation de la moyenne annuelle par rapport à la moyenne de la série, normalisée par l'écart-type de la série temporelle à Batroun (2003-2013).	91
Figure 42 : Moyennes des Températures moyennes dans la colonne d'eau (A) en moyenne mensuelle (ligne noire) et moyenne annuelle mobile (ligne rouge); (B) variabilité interannuelle et saisonnière pour toute la colonne d'eau, les cases blanches représentent les mois sans valeurs ; (C) déviation de la moyenne annuelle par rapport à la moyenne de la série, normalisée par l'écart-type de la série temporelle au point B2 (2000-2013).	93
Figure 43: Moyennes des Salinités moyennes dans la colonne d'eau (A) en moyenne mensuelle (ligne noire) et moyenne annuelle mobile (ligne rouge); (B) variabilité interannuelle et saisonnière, les cases blanches représentent les mois sans valeurs ; (C) déviation de la moyenne annuelle par rapport à la moyenne de la série, normalisée par l'écart-type de la série temporelle au point B2 (2000-2013).	94
Figure 44 : Densité (A) dans couche de surface à 0 m et (B) à 60 m de profondeur en moyenne mensuelle (ligne noire) et moyenne annuelle mobile (ligne rouge); variabilité interannuelle et saisonnière (C) à 0 m et (D) à 60 m, les cases blanches représentent les mois sans valeurs ; (E) déviation de la moyenne annuelle par rapport à la moyenne de la série, normalisée par l'écart-type à 0m et 60 m de la série temporelle au point B2 (2000-2013).	96
Figure 45 : Moyenne annuelle de la stabilité (A) en hiver et en été dans la colonne d'eau; (B) variabilité interannuelle et saisonnière, les cases blanches représentent les mois sans valeurs ; (C) déviation de la moyenne annuelle par rapport à la moyenne de la série, normalisée par l'écart-type en hiver et en été de la série temporelle au point B2 (2000-2013).	98
Figure 46: Concentrations moyennes des orthophosphates ( $\mu\text{M.L}^{-1}$ ) dans la colonne d'eau (A) en moyenne mensuelle (ligne noire) et moyenne annuelle mobile (ligne rouge); (B) variabilité interannuelle et saisonnière, les cases blanches représentent les mois sans valeurs; (C) déviation de la moyenne annuelle par rapport à la moyenne de la série, normalisée par l'écart-type de la série temporelle au point B2 (2000-2013).	100

Figure 47 : Concentrations moyennes des nitrates ( $\mu\text{M.L}^{-1}$ ) dans la colonne d'eau (A) en moyenne mensuelle (ligne noire) et moyenne annuelle mobile (ligne rouge); (B) variabilité interannuelle et saisonnière, les cases blanches représentent les mois sans valeurs ; (C) déviation de la moyenne annuelle par rapport à la moyenne de la série, normalisée par l'écart-type de la série temporelle au point B2 (2000-2013). .....	101
Figure 48 : Concentrations moyennes des nitrites ( $\mu\text{M.L}^{-1}$ ) dans la colonne d'eau (A) en moyenne mensuelle (ligne noire) et moyenne annuelle mobile (ligne rouge); (B) variabilité interannuelle et saisonnière, les cases blanches représentent les mois sans valeurs ; (C) déviation de la moyenne annuelle par rapport à la moyenne de la série, normalisée par l'écart-type de la série temporelle au point B2 (2000 - 2013). .....	102
Figure 49 : Concentrations moyennes du chlorophylle <i>a</i> ( $\text{mg.m}^{-3}$ ) à la surface de l'eau d'origine satellitaire (A) en moyenne mensuelle (ligne noire) et moyenne annuelle mobile (ligne rouge); (B) variabilité interannuelle et saisonnière, les cases blanches représentent les mois sans valeurs ; (C) déviation de la moyenne annuelle par rapport à la moyenne de la série, normalisée par l'écart-type de la série temporelle au point B2 (2000-2013). .....	104
Figure 50 : Concentrations moyennes du (A) des nanoplanctons, (D) des diatomées et (G) des dinoflagellés en moyenne mensuelle (ligne noire) et moyenne annuelle mobile (ligne rouge); variabilité interannuelle et saisonnière du (B) des nanoplanctons, (E) des diatomées et (H) des dinoflagellés, les cases blanches représentent les mois sans valeurs ; déviation de la moyenne annuelle par rapport à la moyenne de la série, normalisée par l'écart-type des C) nanoplanctons, (F) diatomées et (I) dinoflagellés dans la colonne d'eau de la série temporelle au point B2 (2000-2013). .....	106
Figure 51 : Variabilité interannuelle et saisonnière et sommes cumulées des écarts à la moyenne des abondances (A, B, C) et du biovolume (D, E, F) de l'ensemble du zooplancton au point B2 (2000-2013). Les cases blanches représentent les mois sans valeurs. ....	108
Figure 52: Moyenne annuelle de la variabilité interannuelle des abondances ( $\text{ind.m}^{-3}$ ) des différents taxa identifiés par le Zooscan au point B2 (2000-2013). .....	110
Figure 53: Sommes cumulées des écarts à la moyenne des abondances des différents taxa identifiés au point B2 (2000-2013). .....	112
Figure 54 : Evolution temporelle de (A) la biomasse du zooplancton non gélatineux en $\mu\text{g.C.L}^{-1}$ et (B) déviation de la moyenne annuelle par rapport à la moyenne de la série, normalisée par l'écart-type au point B2 (2000-2013). ....	113
Figure 55: Comparaison entre les cycles annuels du biovolume du zooplankton non gelatineux au point B2 (2000-2013) (La ligne noire centrale représente la moyenne et les zones ombrées représentent les quartiles Q1 et Q3) et au Liban (1969-1975) selon Lakkis (1982) (la ligne pointillée en bleue). .....	115
Figure 56 : Boîte à moustache représentant la comparaison des abondances zooplanctoniques entre l'année 2003, 2010 et la série temporelle au point B2 (2000-2013). .....	120
Figure 57 : Carte représentant la distribution spatiale de la chlorophylle-a ( $\text{mg.m}^{-3}$ ) en 2003 issue de l'analyse d'images satellitaires MODIS au niveau du bassin Levantin. ....	121
Figure 58 : Carte représentant la distribution spatiale de la chlorophylle-a ( $\text{mg.m}^{-3}$ ) en 2010 issue de l'analyse d'images satellitaires MODIS au niveau du bassin Levantin. ....	122
Figure 59 : Représentation de 163 spectres NB-SS de zooplancton total au point B2 (2000-2013)	126
Figure 60 : L'analyse en dendrogramme des spectres de tailles NB-SS bruts du zooplancton total au point B2 en utilisant la distance euclidienne entre les classes de taille de chaque spectre. La distance coupée au niveau de 2000 présente 4 groupes majeurs. ....	127

Figure 61 : (A) Moyenne des spectres de taille des groupes, (B) Evolution de l'ensemble du zooplancton selon les groupes issus du dendrogramme sur les spectres de taille en valeurs absolues au point B2 (2000-2013). .....	128
Figure 62 : (A) Boîte à moustache représentant la pente en fonction des groupes issues de l'analyse en dendrogramme, (B) Evolution de la pente des spectres de taille en valeurs absolues de l'ensemble du zooplancton au point B2 (200-2013). .....	129
Figure 63: Relation entre la pente des spectres de taille en valeurs absolues et l'abondance du zooplancton total au point B2 (2000-2013). .....	130
Figure 64: Variabilité interannuelle et saisonnière des quatre groupes du zooplancton total au point B2 (2000-2013). Les cases blanches représentent les mois sans valeurs. ....	131
Figure 65 : Analyse en dendrogramme des spectres de tailles NB-SS cumulés du zooplancton total au point B2 en utilisant la distance euclidienne entre les classes de taille de chaque spectre. La distance coupée à 250 présente 4 groupes majeurs. ....	132
Figure 66 : Groupes majeurs constituant les spectres de tailles cumulés du zooplancton total au point B2 avec la moyenne de chaque groupe marquée en couleur plus foncée. ....	132
Figure 67: Evolution des abondances du zooplancton total en fonction de la distribution des groupes issus de l'analyse des spectres cumulés au point B2 pour la période de 2000-2013. ....	133
Figure 68 : Variabilité interannuelle et saisonnière des groupes issus des spectres de taille cumulés du zooplancton total au point B2 (2000-2013). Les cases blanches représentent les mois sans valeurs .....	133
Figure 69: Distribution spatiale de la chlorophylle dans la Méditerranée en des groupes obtenus par l'analyse en dendrogramme de K-means d'une série allant de 1997 à 2007 (D'ortenzio and Ribera d'alcalà, 2009) et localisation des stations d'échantillonnage fixes du zooplancton selon (NMFS-COPEPOD 2009) BAL = Baléare, VLF = Villefranche- sur-mer, NPL = Golfe de Naples et SAR = Saronikos, en plus de B2 = Batroun. ....	141
Figure 70 : Cycle annuel des abondances et/ou de biomasse des copépodes à A) Villefranche-sur-mer, B) Baléare, C) Golfe de Naples, D) Golfe de Saronikos (selon NMFS-COPEPOD (2009)) et au E) point B2. ....	142

## Table des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques environnementales et biologiques des séries temporelles dans la Méditerranée (selon NMFS-COPEPOD (2009)).	17
Tableau 2 : Détails de quelques séries temporelles de zooplancton occasionnelles et limitées en mer Méditerranée.	18
Tableau 3 : Les volumes mensuels écoulés à l'embouchure de Rivière Al-Jaouz, Batroun d'après Khair et al. (1992).	25
Tableau 4 : Liste des 34 groupes d'objets établie après une identification visuelle sur les images digitalisées de la série temporelle du point B2.	38
Tableau 5: Tests statistiques effectués dans cette étude ainsi que leur application suivant chaque chapitre.	48
Tableau 6 : Pourcentage des copépodes trouvés dans différentes régions de la Méditerranée.	79
Tableau 7 : Résultats du test de Permanova réalisé sur toute la série zooplanctonique et hydrobiologique au point B2.	81
Tableau 8 : Corrélation entre les groupes de taille et les variables hydrologiques, n = nombre des échantillons, r = coefficient de corrélation, $\alpha = 0.05$ .	135